

**PERILAKU LENTUR DAN LEBAR RETAK
BETON SERAT KINERJA TINGGI (HPFRC)
PADA PELAT SATU ARAH**

DISERTASI

**PROGRAM DOKTOR TEKNIK SIPIL
MINAT REKAYASA STRUKTUR**

Ditujukan Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Doktor Teknik



**KRISNAMURTI
NIM. 147060100111007**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
M A L A N G
2019**



**PERILAKU LENTUR DAN LEBAR RETAK
BETON SERAT KINERJA TINGGI (HPFRC)
PADA PELAT SATU ARAH**

DISERTASI

**PROGRAM DOKTOR TEKNIK SIPIL
MINAT REKAYASA STRUKTUR**

Ditujukan Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Doktor Teknik



KRISNAMURTI

NIM. 147060100111007

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2019



DISERTASI

PERILAKU LENTUR DAN LEBAR RETAK BETON SERAT KINERJA TINGGI (HPFRC) PADA PELAT SATU ARAH

KRISNAMURTI
NIM. 147060100111007

telah dipertahankan didepan komisi penguji
pada tanggal 01 Juli 2019
dinyatakan telah memenuhi syarat
untuk memperoleh gelar Doktor Teknik

Komisi Pembimbing,

Pembimbing Utama



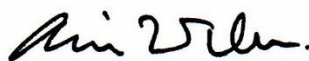
Prof. Dr. Ir. Agoes Soehardjono, MS

Pembimbing Pendamping 1



Dr. Eng. Achfas Zacoeb, ST., MT

Pembimbing Pendamping 2



Ari Wibowo, ST., MT., Ph.D

Malang, 16 Juli 2019
Universitas Brawijaya
Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil
Ketua Program Doktor Teknik Sipil



Dr. Eng. Yulvi Zaika, MT
NIP. 19680707 199403 2 002



HALAMAN IDENTITAS TIM PENGUJI DISERTASI

JUDUL DISERTASI :

PERILAKU LENTUR DAN LEBAR RETAK BETON SERAT KINERJA TINGGI (HPFRC) PADA PELAT SATU ARAH

Nama Mahasiswa : Krisnamurti

NIM : 147060100111007

Program Studi : Program Doktor Teknik Sipil

Minat : Rekayasa Struktur

KOMISI PEMBIMBING :

Pembimbing Utama : Prof. Dr. Ir. Agoes Soehardjono, MS

Pembimbing Pendamping 1 : Dr. Eng. Achfas Zacoeb, ST., MT.

Pembimbing Pendamping 2 : Ari Wibowo, ST., MT., Ph.D

TIM DOSEN PENGUJI :

Dosen Penguji 1 : Prof. Ir. Priyo Suprobo, MS., Ph.D.

Dosen Penguji 2 : Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng.

Tanggal Ujian Tertutup : 08 April 2019

SK Penguji : 556 Tahun 2019

Tanggal Ujian Terbuka : 01 Juli 2019

SK Penguji : 1176 Tahun 2019





KARYA ILMIAH INI KUTUJUKAN KEPADA
AYAHANDA DAN IBUNDA TERCINTA,
ISTRIKU TERKASIH RETNONINGSIH
DAN KEDUA ANAKKU TERSAYANG
BRIHATSAMA DAN ADHYATMA



RIWAYAT HIDUP

Krisnamurti, Bandung, 28 Desember 1966, anak dari ayah Noersasi Marwotohardjo (Alm.) dan ibu Atin Setiatin. Pendidikan SD sampai SMA di kota Malang. Lulus SMA tahun 1986, lulus program Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya tahun 1990, lulus program Magister Teknik di Program Studi Teknik Sipil, Program Pasca Sarjana Universitas Brawijaya tahun 2006. Pengalaman kerja sebagai Kepala Proyek di lingkungan PT Brantas Abipraya sejak tahun 1991 hingga 1998. Bekerja sebagai dosen tetap dengan status Pegawai Negeri Sipil di Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Jember sejak tahun 1999 dengan jabatan terakhir Lektor Kepala dan pangkat Pembina Tingkat I.

Malang, 16 Juli 2019

Penulis,

Krisnamurti





UCAPAN TERIMA KASIH

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, atas berkah rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan disertasi dengan judul “Perilaku Lentur dan Lebar Retak Beton Serat Kinerja Tinggi (HPFRC) pada Pelat Satu Arah”. Penulis sadari bahwa kegiatan penyusunan disertasi ini hanya dapat dilaksanakan dengan izin Allah SWT dan atas bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Menteri Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi beserta segenap jajaran Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi, yang telah memberikan Beasiswa Pendidikan Pasca Sarjana Dalam Negeri (BPPDN) sejak tahun 2014 serta hibah Penelitian Disertasi Doktor pada tahun 2017, sehingga keseluruhan proses studi S3 penulis dapat dilaksanakan dengan baik.
2. Rektor Universitas Jember, Dekan Fakultas Teknik, dan Ketua Jurusan Teknik Sipil beserta segenap jajaran pimpinan di lingkungan Universitas Jember, yang telah memberikan dukungan administrasi maupun pendanaan, untuk melaksanakan kegiatan publikasi pada forum seminar internasional maupun jurnal guna memenuhi persyaratan kelulusan studi S-3, serta dukungan dalam setiap tahap penyusunan disertasi.
3. Rektor Universitas Brawijaya, Ketua Program Pasca Sarjana Universitas Brawijaya (PPSUB), Dekan Fakultas Teknik, dan Ketua Jurusan Teknik Sipil beserta segenap jajaran pimpinan di lingkungan Universitas Brawijaya, yang telah memberikan dukungan fasilitas tempat belajar berupa ruang kandidat S3 di Jurusan Teknik Sipil, fasilitas laboratorium, serta dukungan administrasi kegiatan studi S3 maupun administrasi beasiswa BPPDN.
4. Tim Promotor: Prof. Dr. Ir. Agoes Soehardjono, MS selaku Promotor, Dr. Eng. Achfas Zacob, ST., MT. selaku Ko-Promotor 1, dan Ari Wibowo, ST., MT., Ph.D. selaku Ko-Promotor 2 yang telah membimbing sejak awal kuliah hingga penyelesaian disertasi ini.
5. Dosen Penguji: Prof. Ir. Priyo Suprobo, MS., Ph.D. dan Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng. yang telah memberikan saran dan koreksi sejak proposal hingga selesainya studi ini.
6. Ketua Jurusan Teknik Sipil Dr. Eng. Alwafi Pujirahardjo, ST., MT. dan Ketua Program Studi Doktor Teknik Sipil Dr. Eng. Yulvi Zaika, ST., MT. atas segala arahan, bimbingan, motivasi dan semangat selama penulis menempuh studi S3 hingga selesainya studi ini.
7. Para staff kependidikan jurusan teknik sipil, khususnya Mbak Ella Dwi Widyastuti, Mbak Dilah Ovy Safitri, dan Mbak M. Irdwi Juni Kartika yang telah memberikan dukungan administrasi dan teknis pada setiap tahapan studi S-3.
8. Ir. Sugeng P. Budio, MS. dan Ir. Siti Nurlina, MT. yang telah membantu dalam urusan akademik di awal masa kuliah S3.
9. Kepala Laboratorium Transportasi & Penginderaan Jauh, Hendi Bowoputro, ST., MT., dan Kepala Laboratorium Struktur & Bahan Konstruksi, Prof. Dr. Ir. Sri Murni Dewi, MS., yang telah berkenan memberikan kesempatan untuk menggunakan segala fasilitas laboratorium termasuk tenaga teknisnya (Mas Ferry Fairul, Mas Sugeng Hendri, dan Mas Dino Teguh) selama proses laboratorium penelitian disertasi.

10. Ayah (Alm.) Noersasi Marwotohardjo dan Ibu Atin Setiatin yang telah memberikan doa restu untuk menjalani studi S3 serta mertua saya Bapak (alm.) Prayitno dan Ibu (almh.) Rahayuningsih.
 11. Saudara-saudara saya, Harimurti., Savitri, Wisnumurti, Wikumurti, Gayatri beserta keluarga, dan saudara-saudara ipar saya, Pramono (alm.), Jujuk Prasajo, Enny Lestari, Teguh Pratono (alm.) beserta keluarga, yang telah memberikan dukungan selama saya menjalani masa studi S3.
 12. Istriku Retnoningsih serta anakku Brihatsama dan Adhyatma, yang telah bersabar dan selalu mendukung selama masa studi S3 yang cukup panjang.
 13. Teman-teman Prodi S3 Teknik Sipil FT UB angkatan 2014 hingga 2017 yang selama ini telah bekerja sama dalam proses penyusunan disertasi.
 14. Seluruh pihak yang tidak dapat kami sebutkan satu-persatu yang telah ikut membantu, mendukung, dan mendo'akan dengan tulus ikhlas, semoga Allah SWT membalas dengan limpahan Rahmad dan Barokah-Nya.
- Akhirnya, semoga segala kebaikan dari Bapak/Ibu sekalian akan mendapatkan karunia dan anugerah dari Allah SWT. Aamiin.

Malang, 16 Juli 2019

Penulis,

Krisnamurti



PERNYATAAN ORISINALITAS DISERTASI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Disertasi ini adalah asli dari pemikiran saya, tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Disertasi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Disertasi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 16 Juli 2019

Mahasiswa,



Krisnamurti

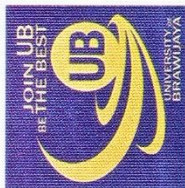
NIM. 147060100111007



TURNITIN



**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM DOKTOR**



SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 022 /UN10.F07.11.31/PP/2019

Sertifikat ini diberikan kepada :

KRISNAMURTI

Dengan Judul Disertasi :

**PERILAKU LENTUR DAN LEBAR RETAK BETON SERAT
KINERJA TINGGI (HPFRC) PADA PELAT SATU ARAH**

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi $\leq 5\%$, dan dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal 08 Juli 2019

Ketua Jurusan Teknik Sipil



Dr.Eng. Alwafi Pujiraharjo, ST., MT
NIP. 19700829 200012 1 001

Ketua Program Studi S3 Teknik Sipil

Dr.Eng. Yulvi Zaika, MT
NIP. 19680707 199403 2 002



RINGKASAN

KRISNAMURTI. Program Doktor Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya. Perilaku Lentur dan Lebar Retak Beton Serat Kinerja Tinggi (HPFRC) pada Pelat Satu Arah. Komisi Pembimbing, Promotor: Agoes Soehardjono, Ko-promotor 1: Achfas Zacoeb, Ko-promotor 2: Ari Wibowo.

Beton serat kinerja tinggi (*High-Performance Fiber-Reinforced Concrete* atau HPFRC) telah berkembang sebagai bahan struktur modern dengan karakteristik rheologi dan mekanik yang unik. Persamaan empiris untuk memprediksi sifat beton atau merancang elemen struktur saat ini masih didasarkan pada hasil uji beton normal. Oleh karena itu diperlukan penilaian ulang dalam rangka penerapan persamaan tersebut pada beton kinerja tinggi. Salah satu komponen dasar memproduksi beton kinerja tinggi (*High-Performance Concrete* – HPC) adalah semen portland jenis I (*Ordinary Portland cement* - OPC). Pada kenyataannya, semen yang beredar di Indonesia adalah jenis Semen Portland Pozolan.

Sementara itu Standar Nasional Indonesia tentang beton serat kinerja tinggi hingga saat ini belum diterbitkan. Penelitian perilaku mekanik beton serat kinerja tinggi dapat digunakan untuk mengembangkan model konstitutif retaknya. Lebar retak sebagai indikator dari keadaan struktur sangat bervariasi. Lebar retak harus diamati untuk menentukan apakah perilaku struktur dan kekuatannya memuaskan. Namun, prediksi atau pengukuran yang akurat dari lebar retak dalam elemen beton struktural sulit untuk dicapai di lapangan.

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) Mengembangkan metode untuk mencapai kualitas beton serat kinerja tinggi melalui rekayasa proporsi bahan penyusun beton di Indonesia. (2) Mengidentifikasi perilaku lentur dan perilaku retak beton serat kinerja tinggi pada pelat satu arah yang dipengaruhi oleh pengaruh lekatan (*bond effect*) antara beton serat kinerja tinggi dan baja tulangan yang diberi perlakuan berupa variasi komposisi serat baja. (3) Mengembangkan persamaan lebar retak maksimum yang dipengaruhi sifat mekanik dan faktor geometri beton serat kinerja tinggi pada pelat satu arah.

Penelitian dilaksanakan dengan melakukan pengujian sifat bahan dan serangkaian percobaan untuk merancang campuran beton serat kinerja tinggi yang memenuhi kriteria f_c' antara 50 MPa - 75 MPa dengan mempergunakan semen Portland Pozolan, silika fume, serat baja, superplastisizer dan bahan agregat yang sering digunakan di kalangan masyarakat jasa konstruksi. Kajian eksperimen dilakukan terhadap pelat HPFRC satu arah setelah parameter fisik dan mekanis bahan penyusun pelat HPFRC diperoleh melalui serangkaian uji laboratorium. Kajian perilaku mekanis pelat HPFRC dilakukan melalui analisis gaya dalam berdasar data pengujian lentur pelat HPFRC. Analisis lebar retak pelat HPFRC dilakukan dengan metode *linear elastic fracture mechanics*.

Hasil yang didapat menunjukkan bahwa *mix design* campuran beton mutu tinggi menggunakan metode volume absolut, dengan batasan berupa rasio air – bahan pengikat (*W/B ratio*) sebesar 0,23 dan diameter maksimal kerikil 19 mm serta variasi kadar silika fume antara 0% hingga 15% terhadap berat semen mampu menghasilkan kuat tekan beton antara 64,84 MPa hingga 70,10 MPa. Dengan perbandingan komposisi Semen PPC : Pasir: Kerikil: Silika Fume: Air: Superplastisizer sebesar 1: 1,328: 1,76: 0,08: 0,213: 0,022 yang diusulkan, kuat tekan rata-rata optimum yang dapat dicapai secara teoritis adalah sebesar 70,70 MPa.

Pada awal proses pengecoran, sebagian superplastisizer dicampur ke dalam air pencampur. Kerikil, pasir, dan silika fume diaduk dalam mixer beton berkapasitas 350 liter selama kurang lebih 4 menit. Selanjutnya semen ditambahkan dan diaduk selama 3 menit hingga campuran terlihat berwarna coklat semen. Berikutnya air bercampur superplastisizer dituangkan ke dalam mixer dan diaduk selama 3 menit. Sisa superplastisizer dimasukkan ke dalam mixer dan setelah total waktu pengadukan 12 menit, campuran siap dituangkan ke dalam cetakan beton.

Perilaku lentur dan lebar retak yang terjadi pada pelat beton serat kinerja tinggi satu arah yang diberi perlakuan berupa penambahan kadar serat baja antara 0,4% hingga 1,0% dari berat volume benda uji dapat diuraikan sebagai berikut. Keruntuhan yang terjadi pada pelat HPFRC satu arah yang diuji menunjukkan terjadinya keruntuhan lentur, yaitu ditandai dengan pola retakan tegak lurus bidang datar di sisi bawah pelat yang dimulai dari tengah bentang. Dengan bertambahnya kadar serat

baja, pelat HPFRC satu arah yang diuji mampu meningkatkan kinerjanya dalam bentuk menahan beban layan yang lebih besar pada saat runtuh. Peningkatan kinerja juga ditunjukkan oleh adanya kecenderungan peningkatan nilai kuat tekan rata-rata, modulus elastisitas, kuat tarik belah, kuat tarik cabut, maupun hasil pengujian lentur spesimen balok dan spesimen pelat. Pada saat beban layan yang terjadi semakin membesar, lendutan yang terjadi pada pelat justru mengalami penurunan. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya kuat lekat (*bond stress*) antara beton serat kinerja tinggi dan baja tulangan sebagai pengaruh penggunaan serat baja. Peningkatan kuat lekat ini juga ditunjukkan oleh bertambahnya tegangan tarik baja maupun *modulus of rupture* (tegangan tarik lentur) beton pada saat pelat mengalami kegagalan lentur.

Berdasarkan hasil pengujian lebar retak, idealisasi perilaku lebar retak pada pelat satu arah yang mengalami keruntuhan pelat sebelum terjadinya leleh baja tulangan menunjukkan pola linier. Sedangkan pada pelat yang baru mengalami keruntuhan setelah terjadinya leleh pada baja tulangan, perilaku lebar retaknya diidealisasikan dengan pola bilinier atau parabola. Dengan dimensi pelat yang sama, akibat dari peningkatan beban layan, lebar retak yang terjadi pada saat pelat HPFRC runtuh meningkat secara proporsional. Hal ini sesuai dengan hasil pengujian yang memperlihatkan bahwa penambahan serat juga diikuti dengan peningkatan pada hasil pengujian tegangan tekan rata-rata, tegangan tarik belah, tegangan tarik cabut, tegangan tarik lentur (*modulus of rupture*), tegangan tarik baja, dan tegangan lekat. Dengan demikian peningkatan kinerja pelat HPFRC akibat penambahan kadar serat adalah berupa peningkatan kapasitas pelat untuk menahan beban layan, namun analisis lebar retak yang terjadi lebih dipengaruhi oleh sifat geometri atau dimensi dari elemen struktur yang diuji. Pola tegangan regangan yang digunakan untuk menghitung modulus elastisitas pada hasil pengujian kuat tekan benda uji silinder beton serat kinerja tinggi menunjukkan perilaku yang cenderung linier, hal ini berbeda dengan hasil analisis tegangan-regangan menurut persamaan Hognestad yang cenderung berbentuk parabola.

Hasil analisis dengan metode *linear elastic fracture mechanics* (LEFM) yang menggunakan konfigurasi pelat HPFRC sebagai elemen lentur murni (PBE) dan konfigurasi pelat HPFRC sebagai elemen lentur tiga titik (TPB) menghasilkan prediksi lebar retak maksimum sekitar 67% apabila dibandingkan lebar retak maksimum menurut ACI 318 atau ACI 224.2R dan sekitar 117% apabila dibandingkan lebar retak maksimum menurut Eurocode 2, serta 157% apabila dibandingkan dengan lebar retak maksimum menurut AS 3600. Hasil ini bersesuaian dengan hasil uji lentur yang dilakukan. Untuk hasil analisis yang menggunakan konfigurasi reaksi hiperstatik tulangan F dan momen lentur M (F&M) diperoleh perbandingan nilai lebar retak maksimum pelat HPFRC sebesar 87% terhadap lebar retak maksimum menurut ACI 318 atau ACI 224.2R dan 151% terhadap lebar retak maksimum menurut Eurocode dan 204% terhadap lebar retak maksimum menurut AS 3600. Hasil ini mendekati lebar retak maksimum menurut hasil analisis slip yang memiliki perbandingan 83% terhadap lebar retak maksimum menurut ACI 318 atau ACI 224.2R, 145% terhadap lebar retak maksimum menurut Eurocode 2 dan 197% terhadap lebar retak maksimum menurut AS 3600.

Kata kunci: beton serat kinerja tinggi, lebar retak, *linear elastic fracture mechanics*

SUMMARY

KRISNAMURTI. Doctoral Program of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Brawijaya University. *Flexural Behavior and Crack Width of The High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (HPFRC) on One-Way Slabs*. Promotor: Agoes Soehardjono, 1st Co-promotor: Achfas Zacob, 2nd Co-promotor: Ari Wibowo.

High-performance fiber-reinforced concrete (HPFRC) has developed as a modern structural material with unique rheological and mechanical characteristics. Empirical equations for predicting the properties of concrete or designing the structure elements still based on the normal strength concrete test results. Therefore it is needed the reassessment to apply that equation to the high strength concrete. One of the necessary components of producing high-performance concrete (HPC) is the Ordinary Portland cement (OPC), but in the recent, the circulating in Indonesia is only Portland Pozzolana Cement.

Meanwhile, the Indonesian National Standard on high-performance fiber-reinforced concrete not yet existed. Research on the mechanic's behavior of high-performance fiber-reinforced concrete can be used to develop the constitutive models of its cracks. The crack width is a good indicator of the structure state and must be observed to determine whether the structure's behavior and strength are satisfactory. However, accurate predictions or measurements of the crack width in concrete structure elements are challenging to achieve in the field.

This study aims to: (1) Develop methods to achieve the quality of high-performance fiber-reinforced concrete through the engineering of materials proportions and describe the making specificity of that concrete using materials available in Indonesia. (2) Identify the flexural and crack behavior of high-performance fiber-reinforced concrete on one-way slabs which are influenced by bond effect between high-performance fiber-reinforced concrete and steel reinforcement with the variations of steel fibers composition. (3) Developing the maximum crack width equation that is influenced by the mechanical properties and geometry factors of high-performance fiber concrete on one-way slabs.

The research is conduct by testing the properties of the material. A series of experiments are done to design high-performance fiber-reinforced concrete mixtures that fulfill the criteria of f_c' between 50 MPa - 75 MPa. The materials are Portland Pozzolanic cement, silica fume, steel fibers, superplasticizers, and aggregate materials. Experimental studies were carried out on one-way HPFRC slabs after the physical and mechanical parameters of the HPFRC slab materials were obtained. The study of the mechanical behavior of the HPFRC slab was carried out through internal forces analysis based on HPFRC slabs flexural test data. Analysis of HPFRC slab crack width was carried out by linear elastic fracture mechanics method.

The results show that the mix design of high strength concrete uses the absolute volume method, with the boundary in the form of a water-binder ratio (W / B ratio) of 0.23 and 19 mm maximum diameter of gravel and a variation of silica fume between 0% to 15% of the weight of cement can produce concrete compressive strength between 64.84 MPa to 70.10 MPa. By the proposed composition of PPC: Sand: Gravel: Silica Fume: Water: Superplasticizer of 1: 1.328: 1.76: 0.08: 0.213: 0.022, the optimum average compressive strength that can be achieved theoretically is 70.70 MPa.

At the beginning of the casting process, a portion of the superplasticizer is mixed into the mixing water. Gravel, sand, and silica fume are stirred in a 350-liter concrete mixer for approximately 4 minutes. Then the cement is added and stirred for 3 minutes until the mixture looks brown cement. Next, the superplasticizer mixed with water is poured into the mixer and stirred for 3 minutes. The remaining superplasticizer is put into the mixer and after a total stirring time of 12 minutes, the mixture is ready to be poured into the concrete mold.

The flexural behavior and crack width that occurs in the one-way high-performance fiber concrete slab treated with the addition of steel fiber content between 0.4% to 1.0% of the weight of the volume of the test object can be described as follows. The collapse that occurs on the one-way HPFRC slab tested shows flexural failure, which is indicated by a crack pattern perpendicular to the flat plane at the bottom side of the slab starting from the middle of the span. With increasing levels of steel fiber, the tested one-way HPFRC slab can improve its performance in the form of holding a more significant service load when it collapses. The increase in performance is also indicated by the tendency of an increase in the average compressive strength, modulus of elasticity, split tensile strength, pullout strength, and the results of flexural testing of beam specimens and plate specimens. When the service load is getting bigger, the deflection that occurs on the slab decreases due to the increase in bond stress between high-performance fiber-reinforced concrete and steel reinforcement as the influence of the use of steel fibers. This increase in bond strength is also indicated by the rise in steel tensile stress and concrete modulus of rupture when the slab collapse.

Based on the results of the crack width test, the idealization of the behavior of the crack width on the one-way slab that collapses before the reinforcing steel yields showed a linear pattern. Whereas on the broken slab after the reinforcing steel yields, the behavior of the crack width is idealized with a bilinear or parabolic model. With the same slab dimensions, resulting from an increase in service load, the crack width that occurs when the HPFRC slab collapses increases proportionally. Following the results of testing which shows that the addition of fiber is also followed by the rise in the test results of the average compressive stress, splitting tensile stress, pullout stress, modulus of rupture, the tensile stress of steel, and bond stress. Thus the increase in HPFRC slab performance due to the addition of fiber content is in the form of increasing slab capacity to withstand service loads, but the analysis of the crack width that occurs is more influenced by the geometry or dimensions of the structural elements being tested. The stress-strain pattern used to calculate the elastic modulus in the test results of cylindrical concrete specimens compressive strength shows linear behavior, this is different from the results of stress-strain analysis according to the Hognestad equation which tends to be parabolic.

The results of the analysis using linear elastic fracture mechanics (LEFM) method that uses HPFRC slab configurations as pure bending elements (PBE) and HPFRC plate configurations as three-point bending elements (TPB) produce a maximum predicted crack width of about 67% compared to the maximum crack width according to ACI 318 or ACI 224.2R and nearly 117% when compared to the maximum crack width according to Eurocode 2, and 157% when compared with the maximum crack width according to AS 3600. This result corresponds to the results of the flexural test performed. For the analysis using the configuration of the reinforced hyperstatic reaction F and bending moment M (F & M), the ratio of the maximum crack width of the HPFRC plate was 87% to the maximum crack width according to ACI 318 or ACI 224.2R and 151% of the maximum crack width according to Eurocode and 204 % of the maximum crack width according to AS 360. This result approaches the maximum crack width according to the results of slip analysis which has a ratio of 83% to the maximum crack width according to ACI 318 or ACI 224.2R, 145% to the maximum crack width according to Eurocode 2 and 197% to width maximum crack according to AS 3600.

Keywords: HPFRC, crack width, linear elastic fracture mechanics

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT, atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis akhirnya dapat menyelesaikan disertasi dengan judul “Perilaku Lentur dan Lebar Retak Beton Serat Kinerja Tinggi (HPFRC) pada Pelat Satu Arah”. Judul tersebut dilatarbelakangi meningkatnya pembangunan infrastruktur seperti jalan bebas hambatan, jembatan antar pulau, dan gedung bertingkat tinggi, sehingga membutuhkan peningkatan kinerja bahan struktur. Sementara berbagai macam peraturan mengenai bahan struktur khususnya bahan beton serat kinerja tinggi di Indonesia perkembangannya masih cukup lambat. Hal ini tentunya akan merugikan masyarakat dunia konstruksi di Indonesia dalam menghadapi perkembangan dunia konstruksi di bidang infrastruktur. Di samping itu, saat ini bahan semen portland type I diganti dengan semen PPC dalam upaya menjaga ekosistem. Hal ini tentu menimbulkan permasalahan dalam mencapai kinerja campuran beton yang diharapkan.

Dalam tulisan ini disajikan pokok bahasan meliputi masalah teknologi bahan dan perilaku mekanik beton serat kinerja tinggi pada pelat HPFRC satu arah. Permasalahan teknologi bahan beton serat kinerja tinggi difokuskan pada upaya mewujudkan rencana campuran dengan metode volume absolut dan cara pencampuran yang tepat guna tercapainya kuat tekan f_c' antara 50 MPa - 75 MPa dengan menggunakan PPC dan agregat lokal. Perilaku mekanik dievaluasi dengan menganalisis pengaruh sifat mekanik beton serat kinerja tinggi dikaitkan dengan perilaku lentur dan perilaku lebar retak dan prediksi lebar retak pelat HPFRC.

Penulis menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan dan keterbatasan kemampuan dalam penyusunan disertasi ini, oleh karena itu segala saran dan masukan yang bermanfaat bagi pengembangan teknologi beton serat kinerja tinggi dan permasalahan analisis lebar retak ini sangat diharapkan. Akhir kata penulis sampaikan terima kasih atas kerjasama dari semua pihak dalam mensukseskan terwujudnya karya disertasi ini.

Malang, 16 Juli 2019

Penulis,

Krisnamurti

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN



DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR.....	xxi
DAFTAR ISI.....	xxiii
DAFTAR TABEL.....	xxvii
DAFTAR GAMBAR.....	xxxiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xli
DAFTAR SIMBOL.....	xlili
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	6
1.3 Batasan Masalah.....	9
1.4 Tujuan Penelitian.....	10
1.5 Manfaat Penelitian.....	10
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	11
2.1 Sifat Fisik, Mekanik, dan Rheologi Bahan Beton Serat Kinerja Tinggi.....	11
2.1.1 Semen sebagai bahan pengikat beton kinerja tinggi.....	12
2.1.2 Pasir dan kerikil sebagai agregat beton kinerja tinggi.....	13
2.1.3 Silika fume dalam pembuatan beton kinerja tinggi.....	14
2.1.4 Superplastisizer sebagai pereduksi kadar air.....	18
2.1.5 Penambahan serat dalam matriks beton.....	19
2.2 Karakteristik Beton Serat Kinerja Tinggi.....	21
2.2.1 Perilaku tegangan regangan beton serat kinerja tinggi.....	22
2.2.2 Modulus elastisitas beton serat kinerja tinggi.....	23
2.3 Rancangan Campuran Beton Serat Kinerja Tinggi.....	25
2.3.1 Komposisi rancangan campuran beton serat kinerja tinggi.....	26
2.3.2 Pencampuran bahan beton serat kinerja tinggi.....	26
2.3.3 Penataan serat pada pelat beton serat kinerja tinggi.....	27
2.3.4 Pembuatan dan perawatan benda uji beton serat kinerja tinggi.....	29
2.3.5 Pengujian kinerja elemen struktur beton serat kinerja tinggi.....	30
2.4 Perilaku Lentur Pelat Beton Serat Kinerja Tinggi.....	30
2.4.1 Pembebanan lateral pada pelat beton serat kinerja tinggi.....	31
2.4.2 Analisis elemen hingga pelat beton serat kinerja tinggi.....	32
2.4.3 Perilaku lentur pelat beton serat kinerja tinggi.....	46
2.5 Tegangan Lekat (<i>Bond Stress</i>) Beton dan Baja Tulangan.....	50
2.6 Retak pada Pelat Beton Serat Kinerja Tinggi.....	57
2.6.1 Persamaan lebar retak maksimum.....	61
2.6.2 Analisis lebar retak dengan metode <i>Linear Elastic Fracture Mechanics</i> (LEFM).....	64
2.6.3 Prediksi lebar retak menurut peraturan (<i>codes provisions</i>).....	71
2.6.4 Faktor-faktor yang mempengaruhi lebar retak.....	78

BAB III KERANGKA KONSEP PENELITIAN.....	81
3.1 Kerangka Pikir.....	81
3.2 Model Konseptual	82
3.3 Hipotesis	86
3.4 Definisi Operasional dan Pengukuran Variabel	86
BAB IV METODE PENELITIAN.....	89
4.1 Penelitian Pendahuluan Karakteristik Beton Serat Kinerja Tinggi	89
4.1.1 Pemeriksaan karakteristik bahan penyusun beton serat kinerja tinggi.....	89
4.1.2 Penyusunan rancangan campuran (<i>mix design</i>) beton kinerja tinggi.....	92
4.1.3 Uji efektifitas silika fume terhadap sifat mekanik beton kinerja tinggi.....	95
4.1.4 Uji efektifitas komposisi serat terhadap sifat mekanik beton serat kinerja tinggi	97
4.2 Pembuatan Struktur Pelat untuk Uji Hipotesis Penelitian.....	102
4.3 Analisis Gaya Dalam pada Pelat Beton Serat Kinerja Tinggi.....	105
4.3.1 Distribusi tegangan-regangan lentur penampang pelat.....	106
4.3.2 Analisis gaya dalam sebelum terjadi retakan.....	109
4.3.3 Gaya dalam dan momen pada saat terjadi retak (M_{cr}).....	111
4.3.4 Gaya dalam pada penampang setelah retak pertama.....	112
4.3.5 Gaya dalam pada penampang paska baja tulangan leleh	112
4.3.6 Gaya dalam pada penampang paska kuat tekan beton terlampaui	112
4.4 Analisis Pelat Menggunakan Metode Elemen Hingga	112
4.5 Tegangan Lekat (<i>Bond Stress</i>).....	116
4.5.1 Tegangan lekat (<i>bond stress</i>) dekat retak lentur pertama.....	116
4.5.2 Tegangan lekat dengan bidang momen simetris	119
4.5.3 Tegangan lekat dengan bidang momen yang berbeda.....	120
4.6 Prediksi Retak dengan Metode <i>Linear Elastic Fracture Mechanics</i>	123
4.6.1 Faktor konsentrasi tegangan.....	124
4.6.2 Fungsi tegangan Airy	126
4.6.3 Fungsi tegangan kompleks	127
4.6.4 Penyelesaian masalah retak	127
4.6.5 Persamaan tegangan pada ujung retak (<i>crack tip</i>).....	130
4.6.6 Daerah plastis pada ujung retakan.....	132
4.6.7 Persamaan faktor intensitas tegangan	133
4.6.8 Faktor geometri	134
4.6.9 Kriteria Griffith	134
4.6.10 Prediksi Lebar retak	137
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN	141
5.1 Karakteristik Bahan Penyusun Beton Kinerja Tinggi	141
5.2 Rancangan Campuran Beton Kinerja Tinggi.....	148
5.2.1 Rancangan campuran	148
5.2.2 Pengujian kuat tekan dan deformasi aksial benda uji	150
5.3 Pengaruh Komposisi Silika Fume terhadap Sifat Mekanik Beton Kinerja Tinggi	153
5.3.1 Hubungan kadar silika fume dengan kuat tekan	154

5.3.2	Berat volume	156
5.3.3	Modulus elastisitas beton kinerja tinggi.....	156
5.4	Pengaruh Komposisi Serat terhadap Sifat Mekanik Beton Serat Kinerja Tinggi	157
5.4.1	Pembuatan benda uji	158
5.4.2	Pengujian kuat tekan	161
5.4.3	Modulus Elastisitas Beton Serat Kinerja Tinggi	162
5.4.4	Pengujian kuat tarik belah	164
5.4.5	Pengujian kuat tarik cabut (<i>pullout test</i>)	166
5.4.6	Pengujian lentur spesimen balok.....	169
5.4.7	Pengujian lentur spesimen pelat	170
5.4.8	Berat Volume Beton Serat Kinerja Tinggi.....	172
5.5	Karakteristik Beton Serat Kinerja Tinggi untuk Pelat Satu Arah.....	173
5.5.1	Uji tarik baja tulangan	173
5.5.2	Pembuatan benda uji pelat HPFRC satu arah.....	175
5.5.3	Pengujian kuat tekan	176
5.5.4	Pengujian kuat tarik belah	177
5.5.5	Modulus Elastisitas	177
5.5.6	Pengujian kuat tarik cabut	179
5.5.7	Berat volume benda uji	180
5.5.8	Sifat mekanik bahan beton serat kinerja tinggi	181
5.6	Pengujian Lentur Pelat HPFRC Satu Arah.....	181
5.7	Perilaku Lentur Pelat HPFRC Satu Arah	184
5.7.1	Analisis gaya dalam pelat beton serat kinerja tinggi.....	184
5.7.2	Distribusi tegangan-regangan akibat lentur pada beton dan baja.....	194
5.7.3	Analisis tegangan lekat.....	197
5.7.4	Lendutan pelat beton serat kinerja tinggi	208
5.7.5	Korelasi kadar serat, sifat mekanik, dan lendutan pelat HPFRC satu arah.....	210
5.8	Perilaku Retak Pelat HPFRC Satu Arah.....	215
5.8.1	Pola retak dan panjang segmen retak	215
5.8.2	Tegangan-regangan pelat beton serat kinerja tinggi	218
5.8.3	Lebar retak berdasar hasil uji pelat HPFRC satu arah	220
5.8.4	Lebar retak berdasar tegangan lekat (<i>bond stress</i>) dan panjang <i>slip (bond slip)</i>	223
5.8.5	Korelasi sifat mekanik dan lebar retak pelat HPFRC satu arah ...	225
5.9	Prediksi Lebar Retak Pelat HPFRC dalam <i>Linear Elastic Fracture Mechanics</i> (LEFM)	229
5.9.1	Diagram <i>moment-curvature</i> hasil uji lentur pelat HPFRC.....	230
5.9.2	Hubungan momen dan kedalaman retak relatif.....	231
5.9.3	Diagram kekuatan sisa	233
5.9.4	Faktor konsentrasi tegangan	236
5.9.5	Tegangan lentur maksimum akibat beban total.....	237
5.9.6	Daerah plastis ujung retakan	238
5.9.7	Faktor intensitas tegangan K_I dan <i>fracture toughness</i> K_{IC}	239
5.9.8	Tingkat pelepasan energi elastis (G_I) dan ketahanan fraktur (R) ..	240
5.9.9	Persamaan faktor intensitas tegangan pelat HPFRC	243
5.9.10	Persamaan lebar retak pada pelat HPFRC satu arah	247

5.9.11 Persamaan faktor intensitas tegangan dengan konfigurasi reaksi hiperstatik tulangan F dan momen lentur eksternal M (F&M) pada elemen pelat.....	251
5.9.12 Persamaan lebar retak elemen dengan reaksi hiperstatik tulangan F dan momen lentur eksternal M (F&M).....	254
5.10 Validasi Persamaan Lebar Retak Pelat HPFRC Satu Arah.....	257
5.10.1 Prediksi lebar retak maksimum berdasar ACI 318-14 dan ACI 224.2R-92.....	257
5.10.2 Prediksi lebar retak maksimum berdasar Eurocode 2-2014.....	259
5.10.3 Prediksi lebar retak maksimum berdasar AS-3600-2000.....	261
5.10.4 Perbandingan hasil analisis dan pengujian lebar retak.....	265
5.10.5 Aplikasi persamaan lebar retak pada pelat HPFRC satu arah yang diuji.....	270
BAB VI PENUTUP.....	275
6.1 Kesimpulan.....	275
6.2 Saran.....	278
DAFTAR PUSTAKA.....	279
DAFTAR PUBLIKASI DAN KEGIATAN ILMIAH PENULIS.....	289
LAMPIRAN.....	291



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 1. 1	Perbedaan Kelas Beton Kinerja Tinggi.....	2
Tabel 1. 2	Sifat Material dan Geometri Serat <i>Dramix® 3D</i>	5
Tabel 2. 1	Persyaratan Kimia Semen Portland: Tipe I (PC) dan Pozolan (PPC)....	12
Tabel 2. 2	Persyaratan Fisik Semen Portland: Tipe I (PC) dan Pozolan (PPC).....	13
Tabel 2. 3	Rangkuman Karakteristik Agregat pada Penelitian Beton Kinerja Tinggi.....	14
Tabel 2. 4	Standar Teknis Silika Fume di Amerika, Eropa, Kanada, dan Jepang	15
Tabel 2. 5	Standar Teknis Silika Fume di China, Brazilia, Korea, Vietnam, dan India	16
Tabel 2. 6	Sifat Fisik Silika Fume.....	16
Tabel 2. 7	Sifat-sifat Serat Baja dan Serat <i>Polyethylene</i>	20
Tabel 2. 8	Rentang Proporsi Beton Serat Baja Normal	26
Tabel 2. 9	Konversi Hasil Uji Kuat Tekan.....	30
Tabel 2. 10	Persamaan Kuat Lekat (<i>Bond Strength</i>) Batang Tulangan	56
Tabel 2. 11	Variabilitas Kuat Tarik Beton.....	58
Tabel 2. 12	Hubungan antara Kuat Tekan dan Kuat Tarik Beton.....	59
Tabel 2. 13	Rumusan Jarak (mm) dan Lebar Retak (mm) yang Diusulkan oleh Beberapa Peneliti	61
Tabel 2. 14	Persamaan K untuk Faktor Geometri Praktis.....	68
Tabel 2. 15	Rumusan Lebar Retak Beberapa Peraturan Beton	77
Tabel 2. 16	Toleransi Lebar Retak.....	79
Tabel 3. 1	Konsep, Variabel, dan Indikator Target Utama Penelitian	87
Tabel 4. 1	Tahapan Penelitian Disertasi.....	91
Tabel 4. 2	Pemeriksaan Karakteristik Bahan Penyusun Beton Serat Kinerja Tinggi.....	92
Tabel 4. 3	Penjelasan Notasi Lembar Kerja Rencana Campuran Beton Kinerja Tinggi.....	94
Tabel 4. 4	Model Benda Uji Silinder untuk Pengujian Efektifitas Silika Fume....	96
Tabel 4. 5	Prosentase Silika Fume Terhadap Berat Semen	96
Tabel 4. 6	Proporsi Serat Baja	97
Tabel 4. 7	Parameter dan Jumlah Benda Uji untuk Pengujian Efektifitas Komposisi Serat	98
Tabel 4. 8	Dimensi Penampang dan Penulangan Pelat Satu Arah.....	103
Tabel 4. 9	Sifat-sifat Bahan Pelat Beton Serat Kinerja Tinggi	103
Tabel 4. 10	Proporsi Serat Baja pada Benda Uji Pelat.....	103
Tabel 4. 11	Parameter Blok Tekan pada Kuat Lentur Penampang Persegi	107
Tabel 4. 12	Hubungan Tegangan Regangan untuk Perilaku Non-linier Struktur....	108
Tabel 5. 1	Hasil Analisis Saringan Pasir (SNI 03-1968-1990, 1990)	142
Tabel 5. 2	Hasil Uji Kadar Air Pasir (SNI 03-1971-1990, 1990)	143
Tabel 5. 3	Hasil Uji Penyerapan Air pada Pasir (SNI 1970:2008, 2008)	143
Tabel 5. 4	Hasil Uji Berat Jenis Pasir (SNI 1970:2008, 2008)	143

Tabel 5. 5	Hasil Uji Kebersihan Pasir terhadap Lumpur (ASTM C 117-03, 2012)	143
Tabel 5. 6	Hasil Analisis Saringan Kerikil (SNI 03-1968-1990, 1990)	144
Tabel 5. 7	Hasil Uji Kadar Air Kerikil (SNI 03-1971-1990, 1990)	145
Tabel 5. 8	Hasil Uji Penyerapan Air pada Kerikil (SNI 1969:2008, 2008)	145
Tabel 5. 9	Hasil Uji Berat Jenis Kerikil (SNI 1969:2008, 2008)	146
Tabel 5. 10	Hasil Uji Keausan Kerikil dengan Mesin Abrasi Los Angeles	147
Tabel 5. 11	Rekapitulasi Hasil Uji Sifat Fisik dan Mekanik Agregat	147
Tabel 5. 12	Komposisi Rencana Campuran Beton per m ³	148
Tabel 5. 13	Kuat Tekan Silinder $\phi 15$ cm x 30 cm Beton Kinerja Tinggi	151
Tabel 5. 14	Kuat Tekan Kubus dan Silinder $\phi 10$ cm x 20 cm Beton Kinerja Tinggi	151
Tabel 5. 15	Spesifikasi Silika Fume	153
Tabel 5. 16	Komposisi Rencana Campuran Beton	154
Tabel 5. 17	Kuat Tekan Silinder Beton $\phi 15$ cm x 30 cm dengan Variasi Kadar Silika Fume	154
Tabel 5. 18	Modulus Elastisitas Beton Kinerja Tinggi dengan Variasi Silika Fume	157
Tabel 5. 19	Spesifikasi Serat <i>Dramix® 3D</i>	158
Tabel 5. 20	Komposisi Bahan Campuran Beton	160
Tabel 5. 21	Spesimen Benda Uji Beton dengan Variasi Komposisi Serat	160
Tabel 5. 22	Hasil Uji Kuat Tekan Silinder $\phi 15$ cm x 30 cm	162
Tabel 5. 23	Modulus Elastisitas Beton Kinerja Tinggi dengan Variasi kadar serat baja	163
Tabel 5. 24	Hasil Uji Kuat Tarik Belah Spesimen HPFRC	165
Tabel 5. 25	Kuat Tarik Cabut (<i>Pullout Test</i>) Tulangan D-10	168
Tabel 5. 26	Kuat Lentur Balok 15 cm x 15cm x 60 cm	170
Tabel 5. 27	Kuat Lentur Spesimen Pelat dengan Metode <i>Center-Point Loading</i>	171
Tabel 5. 28	Kuat Lentur Spesimen Pelat dengan Metode <i>Three-Point Loading</i>	171
Tabel 5. 29	Berat Volume Beton Serat Kinerja Tinggi dengan Variasi Kadar Serat Baja	172
Tabel 5. 30	Hasil Uji Tarik Baja Tulangan D-10 dan $\phi 8$	175
Tabel 5. 31	Komposisi Campuran Beton HPFRC	175
Tabel 5. 32	Benda Uji Beton Serat Kinerja Tinggi dengan Variasi Kadar Serat baja	175
Tabel 5. 33	Kuat Tekan Silinder $\phi 15$ cm x 30 cm	176
Tabel 5. 34	Kuat Tarik Belah Pelat HPFRC	177
Tabel 5. 35	Modulus Elastisitas Beton Kinerja Tinggi	178
Tabel 5. 36	Kuat Tarik Cabut Beton HPFRC dengan Tulangan $\phi 8$	180
Tabel 5. 37	Berat Volume Benda Uji Silinder	180
Tabel 5. 38	Sifat Mekanik Beton Serat Kinerja Tinggi	181
Tabel 5. 39	Data Teknik <i>Strain Gauge</i> Beton dan Baja	183
Tabel 5. 40	Hasil Pengujian Pada Tahap Pembebanan Berbeda	183
Tabel 5. 41	Detail Data Pelat HPFRC	185
Tabel 5. 42	Gaya Dalam pada Kondisi Pra-Retak	185
Tabel 5. 43	Jarak dari Garis Netral ke Sisi Tekan Terluar <i>kd</i> pada Saat Retak	186
Tabel 5. 44	Momen Retak Berdasarkan Perkiraan Nilai <i>kd</i>	187
Tabel 5. 45	Perhitungan Momen Retak (Nawy, 1990)	187
Tabel 5. 46	Gaya Dalam pada Kondisi saat Retak Pertama	188
Tabel 5. 47	Gaya Dalam setelah Retak Hingga Baja Tulangan Leleh	189

Tabel 5. 48	Gaya Dalam pada Penampang Paska Leleh Baja Tulangan	190
Tabel 5. 49	Tegangan dan Momen Pelat HPFRC saat Mengalami Kegagalan Lentur.....	192
Tabel 5. 50	Tegangan Beton dan Baja Pelat HPFRC Saat Runtuh.....	193
Tabel 5. 51	Gaya Dalam Sesuai Perkembangan Retak Pelat HPFRC-1.....	193
Tabel 5. 52	Gaya Dalam Sesuai Perkembangan Retak Pelat HPFRC-2.....	193
Tabel 5. 53	Gaya Dalam Sesuai Perkembangan Retak Pelat HPFRC-3.....	194
Tabel 5. 54	Gaya Dalam Sesuai Perkembangan Retak Pelat HPFRC-4.....	194
Tabel 5. 55	Tegangan, Regangan dan Modulus Elastisitas Beton Serat Kinerja Tinggi.....	195
Tabel 5. 56	Tegangan-Regangan Baja saat Terjadi Kegagalan Pelat HPFRC.....	197
Tabel 5. 57	Tegangan Lekat Awal u_{b0} dan Panjang Segmen Retak Awal S_0	197
Tabel 5. 58	Momen Pada Pada Ujung Kiri (x_1) dan Ujung Kanan (x_2) Segmen Tengah Pelat HPFRC-1.....	199
Tabel 5. 59	Momen Pada Pada Ujung Kiri (x_1) dan Ujung Kanan (x_2) Segmen Tengah Pelat HPFRC-2.....	200
Tabel 5. 60	Momen Pada Pada Ujung Kiri (x_1) dan Ujung Kanan (x_2) Segmen Tengah Pelat HPFRC-3.....	200
Tabel 5. 61	Momen Pada Pada Ujung Kiri (x_1) dan Ujung Kanan (x_2) Segmen Tengah Pelat HPFRC-4.....	200
Tabel 5. 62	Momen dan Panjang Segmen Pelat HPFRC.....	201
Tabel 5. 63	Tegangan Lekat, Tegangan Tarik Baja Tulangan dan Panjang Segmen Retak serta Panjang <i>Slip</i> pada Pelat HPFRC-1.....	202
Tabel 5. 64	Tegangan Lekat, Tegangan Tarik Baja Tulangan dan Panjang Segmen Retak serta Panjang <i>Slip</i> pada Pelat HPFRC-2.....	202
Tabel 5. 65	Tegangan Lekat, Tegangan Tarik Baja Tulangan dan Panjang Penyaluran Pada Segmen Pelat HPFRC-3.....	203
Tabel 5. 66	Tegangan Lekat, Tegangan Tarik Baja Tulangan dan Panjang Segmen Retak serta Panjang <i>Slip</i> pada Pelat HPFRC-4.....	203
Tabel 5. 67	Tegangan Lekat, Tegangan Tarik Baja Tulangan dan Panjang Segmen Retak Pada Segmen Pelat HPFRC Saat Runtuh (<i>Failure</i>).....	206
Tabel 5. 68	Beban P dan Momen Inersia efektif Pelat HPFRC.....	209
Tabel 5. 69	Lendutan Pada Saat Pelat HPFRC Mengalami Kegagalan Lentur.....	209
Tabel 5. 70	Beban dan Sifat Mekanik Pelat HPFRC Hasil Eksperimen.....	210
Tabel 5. 71	Hasil Uji Kuat Lentur Spesimen Beton Serat Kinerja Tinggi.....	212
Tabel 5. 72	Perkembangan Segmen Retakan pada Pelat HPFRC-1 (0,4% serat baja).....	216
Tabel 5. 73	Perkembangan Segmen Retakan pada Pelat HPFRC-2 (0,6% serat baja).....	217
Tabel 5. 74	Perkembangan Segmen Retakan pada Pelat HPFRC-3 (0,8% serat baja).....	217
Tabel 5. 75	Perkembangan Segmen Retakan pada Pelat HPFRC-4 (1,0% serat baja).....	217
Tabel 5. 76	Rekapitulasi Beban dan Momen di Tengah Bentang Pelat HPFRC.....	218
Tabel 5. 77	Perhitungan Lebar Retak Maksimum Pada Level Tulangan Berdasar Hasil Eksperimen.....	222
Tabel 5. 78	Lebar Retak Maksimum Pelat HPFRC.....	222
Tabel 5. 79	Tegangan Lekat dan Kumulatif Panjang <i>Slip</i> Pelat HPFRC.....	224
Tabel 5. 80	Lebar Retak Maksimum Pelat HPFRC Berdasar Analisis Tegangan Lekat	224

Tabel 5. 81	Sifat Mekanik dan Lebar Retak Pelat HPFRC.....	226
Tabel 5. 82	Nilai Kekuatan Residu Dan Faktor Keamanan Struktur.....	234
Tabel 5. 83	Nilai Kuat Sisa dan Faktor Keamanan Struktur.....	236
Tabel 5. 84	Faktor Konsentrasi Tegangan Pelat HPFRC.....	237
Tabel 5. 85	Tegangan Pelat HPFRC saat Runtuh dan Kedalaman Retak Relatif....	238
Tabel 5. 86	Daerah Plastis Ujung Retakan Dan Kedalaman Retak Relatif Pelat HPFRC.....	239
Tabel 5. 87	<i>Fracture Toughness</i> dan Kedalaman Retak Relatif Pelat HPFRC	240
Tabel 5. 88	Tingkat Pelepasan Energi Elastis Kritis G_{IC} , Nilai Ketahanan Fraktur R dan Kedalaman Retak Relatif (ξ).....	243
Tabel 5. 89	Hubungan Faktor Geometri dan Kedalaman Retak Relatif	244
Tabel 5. 90	Persamaan Faktor Intensitas Tegangan Pelat HPFRC	244
Tabel 5. 91	Persamaan Faktor Intensitas Tegangan Pelat HPFRC	245
Tabel 5. 92	Persamaan Faktor Intensitas Tegangan dengan Konfigurasi Pelat HPFRC sebagai Elemen Lentur Murni (PBE).....	245
Tabel 5. 93	<i>Fracture Toughness</i> Pelat HPFRC Dengan Konfigurasi Elemen Lentur Murni (PBE).....	246
Tabel 5. 94	Persamaan Faktor Intensitas Tegangan Dengan Konfigurasi Pelat HPFRC Sebagai Elemen Lentur Tiga Titik (TPB)	246
Tabel 5. 95	<i>Fracture Toughness</i> Pelat HPFRC Dengan Konfigurasi Elemen Lentur Tiga Titik (TPB).....	247
Tabel 5. 96	Persamaan Lebar Retak Pelat HPFRC Dengan Persamaan Tegangan ..	248
Tabel 5. 97	Persamaan Lebar Retak Pelat HPFRC Dengan Konfigurasi Sebagai Elemen Lentur Murni (PBE).....	249
Tabel 5. 98	Prediksi Lebar Retak Maksimum.....	249
Tabel 5. 99	Persamaan Lebar Retak Pelat HPFRC	250
Tabel 5. 100	Persamaan Lebar Retak Pelat HPFRC Dengan Konfigurasi Sebagai Elemen TPB	250
Tabel 5. 101	Prediksi Lebar Retak Maksimum Pelat HPFRC Sebagai Elemen TPB	251
Tabel 5. 102	Persamaan Faktor Intensitas Tegangan (K_I) Pelat HPFRC.....	252
Tabel 5. 103	Persamaan Faktor Intensitas Tegangan K_I	253
Tabel 5. 104	Persamaan Faktor Geometri $Y_M(\xi)$	253
Tabel 5. 105	Persamaan Faktor Intensitas Tegangan.....	254
Tabel 5. 106	Faktor Intensitas Tegangan K_I	254
Tabel 5. 107	Faktor Geometri $Y_F(\xi)$ Pelat HPFRC	254
Tabel 5. 108	Prediksi Lebar Retak Maksimum Akibat Reaksi Tulangan δ_{FF}	256
Tabel 5. 109	Prediksi Lebar Retak Maksimum Akibat Momen δ_{FM}	256
Tabel 5. 110	Prediksi Lebar Retak Maksimum W_{maks} Akibat Reaksi Tulangan F^* dan Momen M^*	257
Tabel 5. 111	Parameter Dalam Analisis Lebar Retak menurut ACI 224.2R-92.....	259
Tabel 5. 112	Prediksi Lebar Retak Maksimum Menurut ACI 318 Dan ACI 224.2R	259
Tabel 5. 113	Parameter Dalam Analisis Lebar Retak menurut Eurocode 2: 2014	260
Tabel 5. 114	Analisis Lebar Retak menurut Eurocode 2-2014.....	261
Tabel 5. 115	Parameter Analisis Lebar Retak AS 3600-2000	265
Tabel 5. 116	Parameter Analisis Lebar Retak AS 3600-2000	265
Tabel 5. 117	Lebar Retak Maksimum (w_{maks}) saat pelat HPFRC runtuh	267
Tabel 5. 118	Prosentase Lebar Retak Maksimum Hasil Analisis Metode LEFM Terhadap Hasil Eksperimen.....	267

Tabel 5. 119	Prosentase Lebar Retak Maksimum Hasil Eksperimen Terhadap Prediksi Menurut ACI 318 atau ACI 224-2R, Eurocode 2 dan AS-3600.....	268
Tabel 5. 120	Prosentasi Lebar Retak Maksimum Hasil Analisis Metode LEFM Terhadap Prediksi Menurut ACI 318 atau ACI 224-2R, Eurocode 2 dan AS-3600	270
Tabel 5. 121	Persamaan Lebar Retak Maksimum Pelat HPFRC Dengan Konfigurasi Elemen Lentur Murni (PBE).....	270
Tabel 5. 122	Hasil Prediksi Lebar Retak Maksimum Pelat HPFRC Menggunakan 4 Persamaan Hasil Analisis LEFM dengan Konfigurasi Elemen Lentur Murni	271
Tabel 5. 123	Persamaan Lebar Retak Maksimum Pelat HPFRC dengan Konfigurasi Elemen Lentur Tiga Titik (TPB)	271
Tabel 5. 124	Hasil Prediksi Lebar Retak Maksimum Pelat HPFRC Menggunakan 4 Persamaan Hasil Analisis LEFM Sebagai Konfigurasi Elemen Lentur Tiga Titik.....	271
Tabel L2. 1	Hasil Ayakan Pasir dalam Zona 3.....	294
Tabel L2. 2	Hasil Ayakan Kerikil dalam Zona 1	294
Tabel L2. 3	Zona Gradasi Agregat Gabungan dalam Rancangan Campuran	294
Tabel L2. 4	<i>Dramix Data Sheet</i>	295
Tabel L2. 5	<i>Sika ViscoCrete - 3115 N Data Sheet</i>	296
Tabel L2. 6	<i>Sika Fume Data Sheet</i>	299
Tabel L6. 1	Data Geometri Pelat HPFRC	313
Tabel L6. 2	Data Sifat Mekanik Beton HPFRC	313
Tabel L6. 3	Persamaan untuk Menghitung Gaya Dalam	314
Tabel L6. 4	Analisis Gaya Dalam pada Penampang Pelat HPFRC-1	315
Tabel L6. 5	Analisis Gaya Dalam pada Penampang Pelat HPFRC-2	316
Tabel L6. 6	Analisis Gaya Dalam pada Penampang Pelat HPFRC-3	317
Tabel L6. 7	Analisis Gaya Dalam pada Penampang Pelat HPFRC- 4.....	318
Tabel L7. 1	Perhitungan Beban P dan Momen Inersia Efektif Pelat HPFRC-1.....	319
Tabel L7. 2	Perhitungan Beban P dan Momen Inersia Efektif Pelat HPFRC-2.....	319
Tabel L7. 3	Perhitungan Beban P dan Momen Inersia Efektif Pelat HPFRC-3.....	319
Tabel L7. 4	Perhitungan Beban P dan Momen Inersia Efektif Pelat HPFRC-3.....	320
Tabel L8. 1	List Program Fortran.....	321
Tabel L8. 2	Input Data Program Fortran	329
Tabel L9. 1	Data Geometri dan Sifat Mekanik Pelat	332
Tabel L9. 2	Tegangan Lekat (u_{bo}) dan Panjang <i>Slip</i> (S_o) Retak Pertama.....	332
Tabel L9. 3	Tegangan Lekat dan Panjang <i>Slip</i> Pelat HPFRC-1.....	332
Tabel L9. 4	Tegangan Lekat dan Panjang <i>Slip</i> Pelat HPFRC-2.....	332
Tabel L9. 5	Tegangan Lekat dan Panjang <i>Slip</i> Pelat HPFRC-3.....	333
Tabel L9. 6	Tegangan Lekat dan Panjang <i>Slip</i> Pelat HPFRC-4.....	333
Tabel L10. 1	Distribusi Tegangan Lekat, Tegangan Tarik dan Perpanjangan Baja Pelat HPFRC-1.....	334
Tabel L10. 2	Distribusi Tegangan Lekat, Tegangan Tarik dan Perpanjangan Baja Pelat HPFRC-2.....	334
Tabel L10. 3	Distribusi Tegangan Lekat, Tegangan Tarik dan Perpanjangan Baja Pelat HPFRC-3.....	335
Tabel L10. 4	Distribusi Tegangan Lekat, Tegangan Tarik dan Perpanjangan Baja Pelat HPFRC-4.....	335
Tabel L11. 1	Distribusi Tegangan Lekat HPFRC-1 saat Pelat Runtuh.....	336

Tabel L11. 2	Distribusi Tegangan Lekat HPFRC-2 saat Pelat Runtuh.....	336
Tabel L11. 3	Distribusi Tegangan Lekat HPFRC-3 saat Pelat Runtuh.....	337
Tabel L11. 4	Distribusi Tegangan Lekat HPFRC-4 saat Pelat Runtuh.....	337
Tabel L12. 1	Hubungan Momen (M) dan Kedalaman Retak relatif (ξ) Pelat HPFRC.....	338
Tabel L12. 2	Hubungan Beban Sisa (P_{res}) dan Kedalaman Retak Relatif (ξ).....	339
Tabel L12. 3	Hubungan Faktor Konsentrasi Tegangan dan Kedalaman Retak Relatif.....	340
Tabel L12. 4	Hubungan Teg. Lentur Pelat HPFRC (σ) dan Kedalaman Retak Relatif ($\xi=a/h$).....	341
Tabel L12. 5	Hubungan Zone Plastis (r_p^*) dan Kedalaman Retak Relatif (ξ) Pelat HPFRC.....	342
Tabel L12. 6	Hubungan Faktor Intensitas Tegangan (K_I) dan Kedalaman Retak Relatif (ξ).....	343
Tabel L12. 7	Hubungan Faktor Geometri $f(\xi)$ dan Kedalaman Retak Relatif (ξ)	344
Tabel L12. 8	Hubungan Faktor Geometri $f(\xi)$ dan Kedalaman Retak Relatif (ξ)	345
Tabel L12. 9	Hubungan Tingkat Pelepasan Energi (G_I), Ketahanan Fraktur (R) dan Kedalaman Retak Relatif (ξ)	346
Tabel L13. 1	Analisis Faktor Geometri Akibat Reaksi Tulangan Pelat HPFRC-1	347
Tabel L13. 2	Analisis Faktor Geometri Akibat Reaksi Tulangan Pelat HPFRC-2	348
Tabel L13. 3	Analisis Faktor Geometri Akibat Reaksi Tulangan Pelat HPFRC-3	349
Tabel L13. 4	Analisis Faktor Geometri Akibat Reaksi Tulangan Pelat HPFRC-4	350
Tabel L13. 5	Analisis Faktor Geometri Akibat Momen Lentur Pelat HPFRC-1	351
Tabel L13. 6	Analisis Faktor Geometri Akibat Momen Lentur Pelat HPFRC-2.....	352
Tabel L13. 7	Analisis Faktor Geometri Akibat Momen Lentur Pelat HPFRC-3.....	353
Tabel L13. 8	Analisis Faktor Geometri Akibat Momen Lentur Pelat HPFRC-4.....	354
Tabel L14. 1	Pembacaan Data Lendutan Pelat HPFRC-1.....	355
Tabel L14. 2	Pembacaan Data Lendutan Pelat HPFRC-2.....	356
Tabel L14. 3	Pembacaan Data Lendutan Pelat HPFRC-3.....	357
Tabel L14. 4	Pembacaan Data Lendutan Pelat HPFRC-4.....	358
Tabel L14. 5	Beban dan Lendutan Hasil Analisis Metode Elemen Hingga (FEM)....	359
Tabel L15. 1	Hubungan Tegangan Regangan HPRC-1	360
Tabel L15. 2	Hubungan Tegangan Regangan HPRC-2	361
Tabel L15. 3	Hubungan Tegangan Regangan HPRC-3	362
Tabel L15. 4	Hubungan Tegangan Regangan HPRC-4	363
Tabel L16. 1	Beban, Kedalaman Retak dan Lebar Retak Pelat HPFRC-1	364
Tabel L16. 2	Beban, Kedalaman Retak dan Lebar Retak Pelat HPFRC-2	365
Tabel L16. 3	Beban, Kedalaman Retak dan Lebar Retak Pelat HPFRC-3	366
Tabel L16. 4	Beban, Kedalaman Retak dan Lebar Retak Pelat HPFRC-4	367
Tabel L16. 5	Beban dan Lebar Retak Pelat Hasil Uji Lentur Pelat.....	368
Tabel L16. 6	Beban dan Lebar Retak Pelat Hasil Analisis Tegangan Lekat	369
Tabel L16. 7	Foto lebar retak menggunakan mikroskop <i>dino-lite</i>	370

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2. 1	Indikasi perkembangan kekuatan beton jangka panjang (w/c rasio tetap).....	17
Gambar 2. 2	Indikasi kekuatan awal sebagai persentase terhadap kekuatan beton 28 hari.	18
Gambar 2. 3	Diagram jumlah superplastisizer, kemampuan aliran dan viskositas mortar.	19
Gambar 2. 4	Pengujian diameter dan kemampuan mengalir mortar beton.....	19
Gambar 2. 5	Berbagai jenis serat yang telah dijadikan bahan penelitian sebagai bahan campuran matriks beton	20
Gambar 2. 6	Diagram tegangan-regangan statis beton	21
Gambar 2. 7	Hasil uji statik <i>four point bending</i> balok 125/125/1000 mm	22
Gambar 2. 8	Respons tegangan-regangan terpilih untuk beton kinerja tinggi tanpa perlakuan khusus.....	23
Gambar 2. 9	Perkiraan respons tegangan-regangan tekan beton kinerja tinggi dengan penguapan dan tanpa penguapan.	23
Gambar 2. 10	Kuat tarik berdasarkan uji <i>modulus of rupture</i>	24
Gambar 2. 11	Kuat tarik berdasarkan uji tarik belah silinder	25
Gambar 2. 12	Regangan spesimen tarik aksial pada rangkaian uji tarik HPFRC.....	27
Gambar 2. 13	Defleksi bentang tengah spesimen lentur <i>four-point bending</i>	28
Gambar 2. 14	Hasil uji faktor orientasi serat	29
Gambar 2. 15	Beban dan tegangan pada pelat.....	32
Gambar 2. 16	(a) Elemen persegi linier di koordinat s-t dan (b) Unsur persegi dipetakan ke segiempat dalam koordinat x-y dengan ukuran dan bentuk ditentukan oleh delapan koordinat nodal $x_1; y_1; \dots; y_4$	33
Gambar 2. 17	Elemen persegi panjang empat node dengan derajat kebebasan nodal.	34
Gambar 2. 18	Variasi dari fungsi bentuk pada elemen persegi linear	35
Gambar 2. 19	Traksi permukaan (<i>Surface traction</i>): p_s dan p_t bekerja pada sisi $t = 1$	38
Gambar 2. 20	Tegangan pada elemen dengan sisi dx dan dy	39
Gambar 2. 21	Asumsi deformasi pada teori lentur pelat Mindlin.....	40
Gambar 2. 22	Tipikal Pelat Mindlin	40
Gambar 2. 23	Pembagian lapisan pelat beton bertulang	41
Gambar 2. 24	Diagram beban-perpindahan getas dan daktail elemen beton bertulang	47
Gambar 2. 25	Pengaruh orientasi serat pada lokasi retak; (a) Akibat uji lentur empat titik dan (b) Akibat uji tarik uniaksial.	49
Gambar 2. 26	Geometri cetakan spesimen uji tarik uniaksial	49
Gambar 2. 27	Diagram tegangan-regangan empat spesimen yang diuji tarik uniaksial.	50
Gambar 2. 28	Mekanisme peralihan gaya lekat.....	51
Gambar 2. 29	(a) Gaya yang bekerja pada <i>interface</i> (b) Aksi mengganjal pada rusuk	51

Gambar 2. 30	Mekanisme kerusakan dan retak pada lekatan: (a) Pandangan samping batang ulir dengan sudut muka deformasi menunjukkan retak Goto (1971); (b) Pandangan ujung menunjukkan pembentukan retak membelah sejajar dengan tulangan.	52
Gambar 2. 31	Definisi dari daerah rusuk relatif R_r	52
Gambar 2. 32	Variasi dalam gaya batang akibat perubahan momen balok.....	53
Gambar 2. 33	Variasi gaya lekat beton dan baja dalam elemen beton bertulang lentur murni: (a) Segmen beton retak; (b) Tegangan lekat bekerja pada batang tulangan; (c) Variasi gaya tarik dalam baja; dan (d) Variasi gaya lekat sepanjang batang.....	54
Gambar 2. 34	Skematik dari: (a) Spesimen <i>pullout</i> ; (b) Spesimen ujung balok; (c) Spesimen angkur pada balok; (d) Spesimen sambungan lewatan.....	55
Gambar 2. 35	Tipe retakan lentur akibat gaya luar.....	58
Gambar 2. 36	Retak primer dan sekunder pada elemen beton bertulang yang mengalami tegangan tarik	60
Gambar 2. 37	Pelat tak terbatas dengan retakan kolinier.....	65
Gambar 2. 38	Tegangan pada tepi potongan pelat tak terbatas dengan retak kolinier	66
Gambar 2. 39	Koreksi lebar terbatas untuk pelat dengan retakan di pusat.	67
Gambar 2. 40	Pengujian <i>crack opening displacement</i> : (a) spesimen COD; (b) Pengukuran COD_m and pendugaan CTOD.	69
Gambar 2. 41	Elemen retak	70
Gambar 2. 42	Definisi lebar retak.....	72
Gambar 2. 43	Pengukuran lebar retak w	73
Gambar 2. 44	Ketinggian batang tarik efektif menurut Eurocode 2.....	74
Gambar 2. 45	Perbandingan model lebar retak.....	80
Gambar 3. 1	Model konseptual penelitian Tahap I.....	83
Gambar 3. 2	Model konseptual Penelitian Tahap II	83
Gambar 3. 3	Model konseptual Penelitian Tahap III.....	84
Gambar 3. 4	Model konseptual Penelitian Tahap IV.....	84
Gambar 3. 5	Model konseptual Penelitian Tahap V	85
Gambar 3. 6	Tiga mode bukaan retakan	88
Gambar 4. 1	Tahapan pelaksanaan penelitian.....	90
Gambar 4. 2	Lembar kerja rencana campuran beton HPC	93
Gambar 4. 3	W/B ratio vs kuat tekan yang direncanakan.....	94
Gambar 4. 4	Menentukan dosis air minimum.....	95
Gambar 4. 5	Kandungan agregat kasar	95
Gambar 4. 6	Uji lentur beton dengan metode <i>center-point loading</i>	99
Gambar 4. 7	Uji lentur beton dengan metode <i>third-point loading</i>	100
Gambar 4. 8	Model spesimen beton serat kinerja tinggi: (a) Spesimen uji <i>pullout</i> , (b) Spesimen balok dan (c) Spesimen pelat lentur.....	100
Gambar 4. 9	Konfigurasi uji lentur spesimen benda uji pelat beton serat kinerja tinggi (a) <i>Three-point bending</i> dan (b) <i>Four-point bending</i>	101
Gambar 4. 10	Spesimen untuk uji kuat tekan dan uji kuat tarik belah	101
Gambar 4. 11	Detail uji tarik belah spesimen silinder $\phi 150 \times 300$ mm	102
Gambar 4. 12	Model benda uji lentur pelat beton serat kinerja tinggi	104
Gambar 4. 13	Setting up uji lentur pelat beton serat kinerja tinggi	104
Gambar 4. 14	Asumsi tegangan-regangan dalam lentur	106
Gambar 4. 15	Blok tegangan persegi	106
Gambar 4. 16	Variasi nilai α_1 dan β_1 terkait dengan kuat tekan beton f_c'	107
Gambar 4. 17	Hubungan tegangan regangan untuk beton tekan.	108

Gambar 4. 18	Definisi regangan inelastis	109
Gambar 4. 19	Diagram tegangan-regangan untuk analisis struktur menurut Eurocode 2	109
Gambar 4. 20	Distribusi tegangan-regangan penampang transversal pelat tidak retak. (a) bagian pelat tidak retak; (b) distribusi tegangan-regangan pada penampang X-X.....	109
Gambar 4. 21	Distribusi tegangan - regangan penampang retak pelat. (a) Penampang retak pelat; (b) distribusi tegangan-regangan pada penampang Y-Y....	111
Gambar 4. 22	Geometri, pembebanan, dan tumpuan model Pelat HPFRC.....	113
Gambar 4. 23	Beban eksternal pada pelat HPFRC satu arah.....	114
Gambar 4. 24	Idealisasi Elemen Hingga Pelat HPFRC.....	114
Gambar 4. 25	Retak lentur pertama pelat; (a) Geometri retak pelat; (b) gaya lekat (<i>bond force</i>) pada batang baja; (c) Tegangan lekat u (<i>bond stress</i>) pada panjang <i>slip</i> (<i>the slip length</i>); (d) Tegangan batang baja pada panjang <i>slip</i> ; (e) Penambahan panjang batang baja.	117
Gambar 4. 26	Distribusi tegangan memanjang pada segmen retak lentur: (a) Geometri perambatan retak; (b) Tegangan lekat u (<i>bond stress</i>); (c) Tegangan tarik memanjang pada pelat beton f_t ; (d) Tegangan tarik memanjang pada baja f_s ; (f) perpanjangan tulangan diukur dari bidang tengah segmen retak.....	120
Gambar 4. 27	Distribusi tegangan memanjang pada segmen retak lentur dengan variasi bidang momen: (a) Geometri perambatan retak; (b) Gaya lekat U (<i>bond force</i>) yang bekerja pada tulangan; (c) Tegangan lekat u (<i>bond stress</i>) (d) Tegangan tarik memanjang pada segmen beton f_t ; (d) Tegangan tarik memanjang pada baja f_s ; (f) perpanjangan tulangan diukur dari bidang tengah segmen retak.	122
Gambar 4. 28	Masalah retak pada struktur, (a) Diagram kuat residu dinyatakan sebagai beban residu atau P_{res} ; (b) kurva kuat residu terkait waktu dan ukuran retak.....	123
Gambar 4. 29	Efek pemotongan salah satu dari dua batang yang di las.....	124
Gambar 4. 30	Garis aliran beban	125
Gambar 4. 31	Retak mode I akibat tegangan biaksial	128
Gambar 4. 32	Masalah umum mode I.....	129
Gambar 4. 33	Retakan pada pelat tidak terbatas.....	131
Gambar 4. 34	Tegangan elastis σ_y pada ujung retak (<i>crack tip</i>).....	131
Gambar 4. 35	Daerah plastis pada ujung retakan. a) asumsi distribusi tegangan; b) aproksimasi distribusi tegangan	133
Gambar 4. 36	Kriteria Griffith untuk jepitan tetap: a) Pelat retak dengan ujung tetap; b) Energi elastis.....	135
Gambar 4. 37	<i>Crack Opening Displacement</i>	138
Gambar 4. 38	Koreksi daerah plastis Irwin.....	138
Gambar 4. 39	Elemen retak	138
Gambar 5. 1	Pengujian kondisi SSD dan analisis saringan agregat halus	141
Gambar 5. 2	Zona pasir hasil analisis saringan (SNI 03-2834-2000, 2000).....	142
Gambar 5. 3	Hasil analisis saringan kerikil pada diagram kerikil zona 1 (ukuran maksimum 40 mm) sesuai (SNI 03-2834-2000, 2000).....	144
Gambar 5. 4	Pengujian berat jenis agregat kasar. (a) Kerikil pada kondisi kering oven; (b) Pengujian berat jenis; (c) skala beberapa butiran kerikil.....	145
Gambar 5. 5	Pengujian keausan agregat kasar dengan Los Angeles test	147
Gambar 5. 6	Zona agregat gabungan dengan diameter maksimum 19,0 mm.....	149

Gambar 5. 7	Pengecoran dan perawatan benda uji beton	150
Gambar 5. 8	Uji kuat tekan beton. (a) kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm (b) silinder $\phi 10$ cm x 20 cm. (c) silinder $\phi 15$ cm x 30 cm	150
Gambar 5. 9	Hubungan W/B ratio dan kuat tekan beton kinerja tinggi dengan variasi bentuk dan dimensi benda uji pada umur 28 hari.....	151
Gambar 5. 10	Korelasi tegangan-regangan pada pengujian silinder $\phi 15\text{cm} \times 30\text{cm}$ dengan variasi W/B ratio dan perbandingannya dengan hasil analisis persamaan tegangan-regangan Hognestad untuk $f'_c = 56,57$ MPa.	152
Gambar 5. 11	Produk silika fume; (a) Kemasan 20 kg; (b) Hasil penimbangan silika fume; (c) Butiran silika fume yang diperbesar menggunakan mikroskop digital <i>Dino-lite</i>	153
Gambar 5. 12	Pengujian kuat tekan dengan variasi kadar silika fume	154
Gambar 5. 13	Hubungan kuat tekan dan kadar silika fume beton kinerja tinggi.....	155
Gambar 5. 14	Hubungan tegangan-regangan beton kinerja tinggi dengan variasi kadar silika fume (SF).....	157
Gambar 5. 15	Cetakan spesimen benda uji beton serat kinerja tinggi	158
Gambar 5. 16	Serat baja untuk campuran beton serat kinerja tinggi; (a) Serat baja <i>Dramix @3D</i> ; (b) Serat baja dalam kemasan 20 kg ; (c) Superplastisizer.....	159
Gambar 5. 17	Superplastisizer <i>Sika® ViscoCrete®-3115 N</i> ; (a) dalam kemasan jerigen 20 kg; (b) Hasil penimbangan untuk pengecoran	159
Gambar 5. 18	Pembuatan spesimen beton serat kinerja tinggi	161
Gambar 5. 19	Uji kuat tekan silinder $\phi 15$ cm x 30 cm. a) alat uji UTM. b) Kerusakan benda uji setelah proses pengujian kuat tekan	161
Gambar 5. 20	Hubungan kuat tekan dan kadar serat baja pada benda uji silinder $\phi 15$ cm x 30 cm.....	162
Gambar 5. 21	Hubungan tegangan-regangan beton serat kinerja tinggi pada benda uji silinder $\phi 15$ cm x 30 cm dengan variasi kadar serat baja.	163
Gambar 5. 22	Hubungan modulus elastisitas dan kadar serat baja pada uji kuat tekan benda uji silinder $\phi 15$ cm x 30 cm.....	164
Gambar 5. 23	Uji tarik belah silinder beton kinerja tinggi	165
Gambar 5. 24	Hubungan kuat tarik belah dan kadar serat baja	166
Gambar 5. 25	Uji tarik cabut (<i>Pullout Test</i>) silinder beton serat kinerja tinggi.....	166
Gambar 5. 26	Skematik penampang melintang uji tarik cabut (<i>Pullout test</i>).....	167
Gambar 5. 27	Hubungan kuat tarik cabut (<i>pullout</i>) tulangan D-10 dan kadar serat baja	168
Gambar 5. 28	Pengujian lentur balok dengan metode <i>center-point loading</i>	169
Gambar 5. 29	Setting pengujian lentur spesimen pelat dengan metode <i>center-point loading</i>	170
Gambar 5. 30	Setting pengujian lentur spesimen pelat dengan metode <i>three-point loading</i>	172
Gambar 5. 31	Uji tarik baja tulangan dengan alat <i>Static-Hydraulic Universal Test Systems MTS</i>	173
Gambar 5. 32	Hasil uji tarik baja tulangan.	174
Gambar 5. 33	Pengecoran benda uji pelat	176
Gambar 5. 34	Hubungan kuat tekan dan kadar serat baja.....	176
Gambar 5. 35	Hubungan kuat tarik belah dan kadar serat baja	177
Gambar 5. 36	Hubungan tegangan-regangan beton serat kinerja tinggi untuk pengujian pelat dengan variasi kadar serat	178
Gambar 5. 37	Hubungan modulus elastisitas pelat HPPRC dan kadar serat baja.	179

Gambar 5. 38	Hubungan kuat tarik cabut tulangan $\phi 8$ (<i>Pullout</i>) dan kadar serat baja	180
Gambar 5. 39	(a) <i>Load cell</i> 20 ton dan (b) pembaca data CAS CL-200A.....	182
Gambar 5. 40	(a) LVDT, (b) <i>Data Logger</i> TDS-630	182
Gambar 5. 41	(a) <i>Strain gauge</i> beton dan (b) <i>Strain gauge</i> baja	183
Gambar 5. 42	Setting pengujian lentur pelat HPFRC.....	183
Gambar 5. 43	<i>Moment-Curvature</i> pelat HPFRC pra-retak	186
Gambar 5. 44	<i>Moment-Curvature</i> pelat HPFRC saat retak pertama	188
Gambar 5. 45	<i>Moment-Curvature</i> pelat HPFRC paska-retak pertama ($f_s < f_y$).....	189
Gambar 5. 46	<i>Momen-Curvature</i> pelat HPFRC paska beban layan ($f_{st} > f_y$).....	190
Gambar 5. 47	Moment-Curvature pelat HPFRC pada kondisi elastis hingga mengalami kegagalan (<i>failure</i>) berdasarkan variasi kadar serat baja dari hasil analisis gaya dalam dengan momen.	191
Gambar 5. 48	Moment-Curvature pelat HPFRC pada kondisi elastis hingga mengalami kegagalan (<i>failure</i>) berdasarkan variasi kadar serat baja. ...	192
Gambar 5. 49	Tegangan-regangan beton hasil uji lentur pelat HPFRC	195
Gambar 5. 50	Tegangan-regangan baja tulangan hasil uji lentur pelat HPFRC	196
Gambar 5. 51	Distribusi tegangan lekat, tegangan tarik baja dan perpanjangan baja saat retak pertama pelat HPFRC	198
Gambar 5. 52	Tegangan lekat pelat HPFRC untuk retak kedua hingga runtuh.....	204
Gambar 5. 53	Tegangan tarik baja HPFRC-1 untuk retak kedua hingga runtuh.....	205
Gambar 5. 54	Perpanjangan batang baja HPFRC-1 untuk retak kedua hingga runtuh	206
Gambar 5. 55	Distribusi tegangan lekat, tegangan tarik baja dan perpanjangan baja pada saat mengalami kegagalan lentur.....	207
Gambar 5. 56	Hubungan beban-lendutan pada uji lentur pelat HPFRC.....	208
Gambar 5. 57	Pengaruh penambahan kadar serat terhadap lendutan pada uji lentur pelat HPFRC	210
Gambar 5. 58	Hubungan beban dengan sifat mekanik pelat HPFRC.....	211
Gambar 5. 59	Hubungan kadar serat dan tegangan tarik lentur spesimen HPFRC.....	212
Gambar 5. 60	Hubungan beban eksternal maksimum dan lendutan pelat HPFRC.....	213
Gambar 5. 61	Hubungan tegangan tekan beton dengan lendutan pelat HPFRC.....	213
Gambar 5. 62	Hubungan tegangan tarik beton dengan lendutan pelat HPFRC.....	214
Gambar 5. 63	Hubungan tegangan tarik baja dengan lendutan pelat HPFRC.....	214
Gambar 5. 64	Hubungan tegangan lekat dengan lendutan pelat HPFRC.....	215
Gambar 5. 65	Pola retak dan jarak retak lentur pelat HPFRC dengan variasi serat baja	216
Gambar 5. 66	Hubungan tegangan-regangan tekan beton serat kinerja tinggi	218
Gambar 5. 67	Hubungan tegangan-regangan tarik baja tulangan pelat HPFRC	219
Gambar 5. 68	Pengukuran deformasi horisontal menggunakan LVDT	219
Gambar 5. 69	Hubungan tegangan-regangan tarik beton pada uji lentur pelat HPFRC	220
Gambar 5. 70	Hubungan antara beban dan bukaan retak pelat HPFRC	221
Gambar 5. 71	Pengaruh kadar serat terhadap lebar retak maksimum hasil uji lentur pelat HPFRC	223
Gambar 5. 72	Hubungan tegangan lekat dan kumulatif panjang <i>slip</i> s_0 pelat HPFRC	224
Gambar 5. 73	Pengaruh kadar serat terhadap lebar retak maksimum hasil analisis tegangan lekat pelat HPFRC	225
Gambar 5. 74	Hubungan antara beban dengan lebar retak maksimum pelat HPFRC pada saat runtuh	226
Gambar 5. 75	Hubungan antara tegangan tekan beton dengan lebar retak pelat HPFRC	227

Gambar 5.76	Hubungan antara tegangan tarik beton dengan lebar retak pelat HPFRC	227
Gambar 5.77	Hubungan antara tegangan tarik baja dengan lebar retak pelat HPFRC	228
Gambar 5.78	Hubungan antara tegangan lekat dengan lebar retak pelat HPFRC	228
Gambar 5.79	Hubungan <i>Moment-Curvature</i> pelat HPFRC	231
Gambar 5.80	Hubungan momen dan kedalaman retak relatif $\xi=a/h$	232
Gambar 5.81	Diagram kuat residu untuk pelat dengan pengaku underreinforced.	234
Gambar 5.82	Hubungan beban residu (P_{res}) dan kedalaman retak a pelat HPFRC	235
Gambar 5.83	Hubungan kekuatan residu (σ_{res}) dan kedalaman retak relatif ξ pelat HPFRC	236
Gambar 5.84	Hubungan faktor konsentrasi tegangan (k_t) dan kedalaman retak relatif (ξ)	237
Gambar 5.85	Hubungan tegangan lentur pada pelat HPFRC (σ) dan kedalaman retak relatif (ξ)	238
Gambar 5.86	Ukuran daerah plastis ujung retakan pada pelat HPFRC	239
Gambar 5.87	Hubungan faktor intensitas tegangan (K_I) dan kedalaman retak relatif (ξ)	240
Gambar 5.88	Hubungan tingkat pelepasan energi G_I dan kedalaman retak relatif (ξ)	241
Gambar 5.89	Hubungan ketahanan fraktur R dan kedalaman retak relatif (ξ)	241
Gambar 5.90	Tingkat pelepasan energi (G_I) dan ketahanan fraktur (R) pelat HPFRC	242
Gambar 5.91	Elemen pengujian lentur dengan metode (a) <i>three-point bending</i> dan (b) lentur murni (<i>pure bending element</i>)	243
Gambar 5.92	Hubungan faktor geometri $f(\xi)$ dengan kedalaman retak relatif (ξ)	244
Gambar 5.93	Faktor intensitas tegangan K_I dengan konfigurasi elemen lentur murni (PBE)	246
Gambar 5.94	Faktor intensitas tegangan K_I dengan konfigurasi elemen lentur tiga titik (TPB)	247
Gambar 5.95	Hubungan faktor geometri $V(\xi)$ dengan kedalaman retak relatif (ξ)	248
Gambar 5.96	Hubungan faktor geometri $V(\xi)$ dengan kedalaman retak relatif (ξ)	250
Gambar 5.97	Elemen pelat HPFRC bertulangan baja yang telah retak	251
Gambar 5.98	Hubungan faktor geometri $Y_M(\xi)$ dengan kedalaman retak relatif (ξ) ..	252
Gambar 5.99	Hubungan faktor geometri $Y_F(\xi)$ dengan kedalaman retak relatif (ξ) ...	253
Gambar 5.100	Rotasi lokal pada penampang tidak retak (a) dan penampang retak (b) pada penampang melintang pelat HPFRC.	255
Gambar 5.101	Bukaan retak akibat reaksi tulangan dan momen	255
Gambar 5.102	Parameter $\sqrt[3]{dc A}$ dalam pengertian jarak antara batang tulangan	258
Gambar 5.103	Hubungan lebar retak maksimum dengan beban eksternal P masing-masing pelat hasil pengujian lentur dan dari hasil analisis	266
Gambar 5.104	Perbandingan lebar retak maksimum hasil eksperimen dengan hasil analisis menggunakan metode LEFM	267
Gambar 5.105	Perbandingan lebar retak maksimum hasil eksperimen dengan prediksi menurut ACI 318, Eurocode 2, dan AS 3600	268
Gambar 5.106	Perbandingan lebar retak maksimum hasil Analisis metode LEFM Terhadap Prediksi Menurut ACI 318 atau ACI 224-2R, Eurocode 2 dan AS-3600	269

Gambar 5.107 Hubungan kedalaman retak relatif dan lebar retak yang dianalisis berdasar persamaan W_{maks1} dan W_{maks2} sebagai konfigurasi PBE dan TPB	272
Gambar 5.108 Hubungan kedalaman retak relatif dan lebar retak yang dianalisis berdasar persamaan W_{maks3} dan W_{maks4} sebagai konfigurasi PBE dan TPB	272
Gambar L3. 1 Rancangan Campuran dengan W/B = 0,32.....	301
Gambar L3. 2 Rancangan Campuran dengan W/B = 0,30.....	302
Gambar L3. 3 Rancangan Campuran dengan W/B = 0,28.....	303
Gambar L3. 4 Rancangan Campuran dengan W/B = 0,26.....	304
Gambar L3. 5 Rancangan Campuran dengan W/B = 0,23.....	305
Gambar L3. 6 Rancangan Campuran dengan W/B = 0,20.....	306
Gambar L4. 1 Rancangan Campuran dengan kadar silika fume 0% dari berat semen	307
Gambar L4. 2 Rancangan Campuran dengan kadar silika fume 5% dari berat semen	308
Gambar L4. 3 Rancangan campuran dengan kadar silika fume 10% dari berat semen	309
Gambar L4. 4 Rancangan campuran dengan kadar silika fume 15% dari berat semen	310
Gambar L5. 1 Rancangan campuran pembuatan spesimen uji kadar serat	311
Gambar L5. 2 Rancangan campuran pembuatan benda uji pelat satu arah	312
Gambar L6. 1 Distribusi tegangan dan regangan pelat tidak retak. (a) bagian pelat tidak retak; (b) distribusi tegangan-regangan pada penampang X-X ...	313
Gambar L6. 2 Distribusi tegangan - regangan pada penampang retak pelat. (a) Penampang retak pelat; (b) distribusi tegangan-regangan pada penampang Y-Y	313

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN



DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul	Halaman
Lampiran 1	Evolusi Perkembangan Teknologi Beton Kinerja Tinggi.....	291
Lampiran 2	Hasil Analisis Saringan Pasir dan Kerikil.....	294
Lampiran 3	Rancangan Proporsi Campuran Beton Kinerja Tinggi dengan Metode Volume Absolut untuk variasi W/B sebesar 0,32 hingga 0,20.....	301
Lampiran 4	Rancangan Proporsi Campuran Beton Kinerja Tinggi dengan Metode Volume Absolut untuk variasi kadar silika fume sebesar 0% hingga 15% dari berat semen.....	307
Lampiran 5	Rancangan Proporsi Campuran Beton Serat Kinerja Tinggi dengan Metode Volume Absolut Untuk Variasi Kadar Serat Baja Untuk Pembuatan Spesimen Uji Dan Pelat.	311
Lampiran 6	Analisis Gaya Dalam Pelat HPFRC.....	313
Lampiran 7	Beban dan Momen Inersia Efektif Pelat	319
Lampiran 8	Analisis Elemen Hingga Pelat HPFRC.....	321
Lampiran 9	Tegangan Lekat pada Retakan Pertama Hingga Runtuh	332
Lampiran 10	Distribusi Tegangan Lekat pada saat Retak Pertama Pelat HPFRC.....	334
Lampiran 11	Distribusi Tegangan Lekat saat Pelat HPFRC Mengalami Kegagalan Lentur.....	336
Lampiran 12	Analisis LEFM Pelat HPFRC sebagai <i>Three Point Bending Element</i> (TPB) dan <i>Pure Bending Element</i> (PBE).....	338
Lampiran 13	Analisis LEFM Pelat HPFRC Akibat Reaksi Tulangan dan Momen Lentur.....	347
Lampiran 14	Lendutan Pelat HPFRC.....	355
Lampiran 15	Tegangan Regangan Hasil Uji Pelat HFPRC.....	360
Lampiran 16	Beban, Kedalaman Retak Relatif dan Lebar Retak	364



HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

DAFTAR SIMBOL

Simbol	Besaran dasar	Satuan dan Singkatannya
A_c	Luas penampang elemen beton	Milimeter atau mm
A_e	luas efektif beton	Milimeter atau mm
A_f	Luas penampang serat	Milimeter atau mm
A_g	Luas penampang beton	Milimeter persegi atau mm ²
A_{st}	Luas penampang baja tarik total	Milimeter persegi atau mm ²
A_{tr}	Luas tulangan sengkang	Milimeter persegi atau mm ²
B	Massa binder	Kg/m ³
D	Diameter tulangan baja ulir	Milimeter atau mm
E	Modulus Elastisitas atau <i>Modulus Young's</i>	Giga Pascal atau GPa
E_c	Modulus elastisitas beton tekan	MPa
E_s	Modulus elastisitas baja tulangan	MPa
E_{ct}	Modulus elastisitas beton tarik	MPa
F_{ct}	Gaya tekan pada pelat beton	Newton
F_{ct}	Gaya tarik yang diberikan oleh beton	Newton
F_c	Gaya tekan yang diberikan oleh beton	Newton
F_{st}	Gaya tarik yang diberikan oleh tulangan baja	Newton
F_{SP}	Faktor modifikasi jarak retak	Tanpa satuan
F_{WD}	Faktor modifikasi lebar retak	Tanpa satuan
G	Tingkat pelepasan energi elastis per ujung retak	
G_c	Berat jenis semen atau bahan perekat	Tanpa satuan
G_{SSD}	Berat jenis agregat dalam kondisi SSD	Tanpa satuan
G_{sup}	Berat jenis superplastisizer cair	Tanpa satuan
K_I	Faktor intensitas tegangan	
L	jarak antar tumpuan	Milimeter atau mm
M	Momen lentur	Newton-mm
M_{cr}	Momen retak	Newton-mm
M	Berat isi agregat dalam kondisi kering oven	Kg/m ³
M_{SSD}	Berat isi agregat dalam kondisi kering permukaan	Kg/m ³
M_{sol}	Massa superplastisizer padat	unit
N_f	Jumlah serat	
P_z	Beban luar dalam arah sumbu z	Newton atau N
P_{res}	Beban sisa atau residu	Newton atau N
R_m	Viskositas mortar beton	Tanpa satuan
S_o	Jarak dari <i>zero-slip point</i> ke retakan pelat	Milimeter atau mm
S_a	Berat jenis semu	Tanpa satuan
S_d	Berat jenis curah kering	Tanpa satuan
S_s	Berat jenis curah JKP	Tanpa satuan
S_w	Penyerapan air	%
U	Gaya lekat per satuan panjang	Newton/mm
V	Gaya Geser pada penampang	Newton atau N
V_s	Volume relatif baja pada lapisan yang dihitung	m ³

Simbol	Besaran dasar	Satuan dan Singkatannya
V_c	Volume relatif HPFRC pada lapisan yang dihitung	m^3
V_f	Rasio volume serat	Tanpa satuan
V_{liq}	Volume superplastisizer cair	
V_w	Volume air dalam superplastisizer cair	
V_{sol}	Volume superplastisizer padat	
W	Massa air dalam beton	Kg/m^3
W_{abs}	Penyerapan air agregat	%
W_{tot}	Total kadar air dari agregat	%
W_h	Kelembaban agregat: $W_h = W_{tot} - W_{abs}$	%
$W/B \text{ ratio}$	Perbandingan berat air dan bahan pengikat (<i>water/binder ratio</i>)	Tanpa satuan
a	Kedalaman retak	Milimeter atau mm
b	lebar efektif pelat	Milimeter atau mm
c	Tebal selimut beton	Milimeter atau mm
d	Jarak tulangan dari sisi tekan pelat beton atau tebal efektif pelat beton	Milimeter atau mm
d	Dosis superplastisizer sebagai prosentase masa padat dibandingkan dengan total bahan semen	%
d_b	Diameter batang tulangan	Milimeter atau mm
e_{so}	Perpanjangan baja	Milimeter atau mm
e_{co}	Perpanjangan beton	Milimeter atau mm
f_c'	Kuat tekan beton	Mega Pascal atau MPa
f_f	Tegangan tarik serat baja	Mega Pascal atau MPa
f_t	Modulus keruntuhan atau kuat tarik lentur beton atau <i>Modulus of rupture</i>	Mega Pascal atau MPa
f_{sp}'	Kuat tarik belah silinder beton	Mega Pascal atau MPa
f_{ct}	Kuat tarik beton di bawah garis netral	Mega Pascal atau MPa
f_s, f_{st}	Kuat tarik baja	Mega Pascal atau MPa
f_t	Kuat tarik langsung beton	Mega Pascal atau MPa
f_{s1}, f_{s2}	Tegangan baja tarik	
$f(\xi), f(a/h)$	Faktor geometri pelat	Tanpa satuan
f_y	Kuat leleh baja tulangan	MPa
h	tebal pelat	Milimeter atau mm
$k_1, k_2 \text{ dan } k_3$	parameter blok tegangan pada kuat lentur penampang persegi	Tanpa satuan
$k_t d$	Jarak sumbu netral ke pusat blok tegangan tarik beton	Milimeter atau mm
$k_c d$	Jarak sumbu netral ke pusat blok tegangan tekan	Milimeter atau mm
k_t	Faktor konsentrasi tegangan = σ_m / σ_0	Tanpa satuan
kd	Jarak garis netral dari sisi tekan terluar	Milimeter atau mm
$l_{s,max}$	Jarak maksimum terjadinya <i>slip</i> antara beton dan baja	Milimeter atau mm
m_x	Momen lentur pada elemen pelat	Newton milimeter atau N-mm
n	Jumlah batang tulangan	batang
n	Rasio modulus elastisitas baja terhadap beton	Tanpa satuan
q_x	Gaya geser transversal	Newton atau N
r_0	Diameter aliran cone	Milimeter atau mm
r_1, r_2	Diameter aliran terukur	Milimeter atau mm

Simbol	Besaran dasar	Satuan dan Singkatannya
r_p^*	ukuran daerah plastik ujung retakan	Milimeter atau mm
s	Jarak Slip	Milimeter atau mm
s	Jarak sengkang, jarak tulangan	Milimeter atau mm
s	Total kadar padat superplastisizer	%
s_{ave}	Jarak retak rata-rata	Milimeter atau mm
s_{min}	Jarak retak minimum	Milimeter atau mm
s_{max}	Jarak retak maksimum	Milimeter atau mm
t	Waktu terukur	Detik
u_b	Kuat lekat (<i>bond stress</i>)	Mega Pascal atau MPa
u, v, w	Komponen perpindahan atau lendutan	Milimeter atau mm
ν	Angka poisson	Tanpa satuan
w_c	Berat jenis beton	Kilogram per meter kubik atau kg/m^3
w_k	Lebar retak karakteristik	Milimeter atau mm
w_{max}	Lebar retak maksimum	Milimeter atau mm
$w_{s,ave}$	Lebar retak rata-rata	Milimeter atau mm
$w_{t,ave}$	Lebar retak rata-rata pada permukaan tarik	Milimeter atau mm
$w_{t,max}$	Lebar retak maksimum pada permukaan tarik	Milimeter atau mm
x	jarak garis netral ke serat tekan terluar.	Milimeter atau mm
y_t	Jarak dari sumbu netral menuju permukaan tegangan tarik beton	Milimeter atau mm
y	Jarak dari sumbu netral menuju permukaan tegangan tekan beton	Milimeter atau mm
α_f	Faktor orientasi serat	Tanpa satuan
β	Faktor geometri	Tanpa satuan
$\sigma_{f,avg}$	Tegangan tarik rata-rata serat pada retakan	Mega Pascal atau MPa
$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$	Komponen tegangan pada pelat	Mega Pascal atau MPa
$\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$	Komponen regangan pada pelat	Tanpa satuan
σ_1, σ_2	Komponen tegangan utama	Mega Pascal atau MPa
σ_m	Pembesaran tegangan nominal	MPa
μ	Daktilitas elemen struktur	Tanpa satuan
Δu	Regangan ultimit tulangan lentur	Tanpa satuan
Δy	Regangan leleh tulangan	Tanpa satuan
ρ	Rasio tulangan	Tanpa satuan
ϕ	Diameter batang baja polos	Milimeter atau mm
ϕ	Curvature atau kelengkungan akibat momen = $\frac{\epsilon_c}{kd}$	-/mm
$\rho = R$	radius lengkungan	
ϵ_c	Regangan tekan beton	Tanpa satuan
ϵ_0	Regangan tekan beton = 0,002	Tanpa satuan
ϵ_u	Regangan tekan ultimit beton = 0,0038	Tanpa satuan
ϵ_{sm}	Rata-rata regangan baja sepanjang $l_{s,max}$	Tanpa satuan
ϵ_{cm}	Rata-rata regangan beton sepanjang $l_{s,max}$	Tanpa satuan
ϵ_{cs}	Regangan susut beton	Tanpa satuan
$\epsilon_s, \epsilon_{st}$	Regangan tarik baja tulangan	Tanpa satuan
ξ	Perbandingan kedalaman retak terhadap tebal pelat = a/h	Tanpa satuan

Simbol	Besaran dasar	Satuan dan Singkatannya
$\phi'(s_o)$	Hubungan konstitutive untuk menghitung kuat lekat beton	MPa
$\phi(\epsilon_c)$	Tegangan tekan beton pada saat regangannya ϵ_c	MPa
Σo	Jumlah perimeter penyaluran batang tulangan	Milimeter atau mm
f_m	Kemampuan mengalir mortar beton	Tanpa satuan
ν	Rasio Poisson	Tanpa satuan



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton serat kinerja tinggi telah berkembang sebagai bahan struktur modern dengan karakteristik rheologi dan mekanik yang unik. Penggunaan beton serat kinerja tinggi pada elemen balok dan pelat jembatan diharapkan dapat mengefisienkan dimensinya sehingga berakibat pada pengurangan bobot jembatan, namun beban lalu lintas akan tetap terlayani dengan baik. Penggunaan beton mutu tinggi (*high strength concrete*) dan beton serat kinerja tinggi (*High-Performance Fiber-Reinforced Concrete* atau HPFRC) di Indonesia tergolong masih sedikit apabila dibandingkan dengan penggunaan beton dengan mutu normal (*normal strength concrete*). Sejalan berkembangnya pembangunan jalan bebas hambatan, jembatan antar pulau, dan gedung bertingkat tinggi, kebutuhan akan beton serat kinerja tinggi tentunya akan meningkat. Untuk mengantisipasinya, diperlukan peningkatan kemampuan tenaga ahli Indonesia dalam memahami karakteristik beton serat kinerja tinggi dalam perencanaan campuran beton sesuai kondisi di Indonesia, dan memanfaatkan kinerja sifat mekaniknya dalam mendesain struktur maupun elemen struktur.

Dalam "*Guide to Quality Control and Assurance of High-Strength Concrete*" (ACI 363.2R-11, 2011) dijelaskan bahwa beton kinerja tinggi (*High Performance Concrete* - HPC) adalah beton yang telah dirancang agar lebih tahan lama dan, jika perlu, lebih kuat dari beton konvensional. Dalam "*State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete*" disebutkan bahwa beton kinerja tinggi merupakan bahan yang sangat kompleks (ACI 363R-92, 1997). Sedangkan beton mutu tinggi (*High Strength Concrete* atau HSC) adalah beton yang memiliki kuat tekan lebih dari 55 MPa atau lebih, dan tidak termasuk *polymer-impregnated concrete*, *epoxy concrete*, atau beton yang menggunakan agregat buatan dengan berat normal (*normal weight*) atau sangat berat (*heavy weight*). Nilai 55 MPa dipilih karena mewakili tingkat kekuatan di mana perawatan khusus diperlukan untuk produksi dan pengujian beton dan di mana persyaratan desain struktural khusus mungkin diperlukan. Campuran HPC pada dasarnya terdiri dari bahan yang sama dengan campuran beton konvensional, tetapi proporsinya dirancang, atau direkayasa, untuk memberikan kekuatan

dan daya tahan yang dibutuhkan untuk persyaratan struktural dan lingkungan proyek. (ACI 363.2R-11, 2011).

Perkembangan kuat tekan beton kinerja tinggi dibahas pula dalam "*Report on High-Strength Concrete*" (ACI 363R-10, 2010) yang menjelaskan bahwa penggunaan dan definisi beton mutu tinggi telah mengalami perkembangan bertahap dan berkelanjutan selama bertahun-tahun. Pada 1950-an, beton dengan kekuatan tekan 34 MPa dianggap kekuatan tinggi. Pada 1960-an, beton dengan kekuatan tekan 41 MPa dan 52 MPa diproduksi secara komersial. Pada awal 1970-an, beton dengan kuat tekan 62 MPa diproduksi. Saat ini, kekuatan tekan mendekati 138 MPa telah digunakan dalam bangunan *cast-in-place*. Beton kinerja tinggi dapat dibagi menjadi lima kelas sebagaimana terlihat pada Tabel 1.1 (Aïtcin, 2004).

Tabel 1. 1 Perbedaan Kelas Beton Kinerja Tinggi

No.	Beton Kinerja Tinggi	Kuat Tekan (MPa)
1	Kelas I	50 - 75
2	Kelas II	75 - 100
3	Kelas III	100 - 125
4	Kelas IV	125 - 150
5	Kelas V	di atas 150

Sumber: (Aïtcin, 2004)

Di Indonesia, masih banyak persamaan empiris untuk memprediksi sifat-sifat beton atau merancang elemen struktur didasarkan pada pengujian beton dengan kuat tekan kurang dari 41 MPa. Oleh karena itu diperlukan penilaian ulang (*reassessment*) persamaan-persamaan tersebut untuk diterapkan pada beton kinerja tinggi. Ditinjau dari sifat mekaniknya, kemampuan beton kinerja tinggi (HPC) untuk menahan tarik dan geser sangat kecil, yaitu dalam kisaran antara 8-15% dari kuat tekan (Aulia & Rinaldi, 2015). Kuat tarik yang rendah dan kegetasan yang tinggi dari beton kinerja tinggi dapat ditingkatkan dengan menambahkan serat ke dalam beton.

SNI tentang beton kinerja tinggi yang berlaku saat ini adalah "Tata cara pemilihan campuran untuk beton normal, beton berat dan beton massa" (SNI 7656:2012, 2012) dan "Tata cara perencanaan campuran tinggi dengan semen portland dengan abu terbang" (SNI 03-6468-2000, 2000). Sementara dalam "Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung" (SNI 2847:2013, 2013) di atur tentang serat baja diskontinu untuk perkuatan beton. SNI yang khusus mengatur tentang beton serat kinerja tinggi hingga saat ini belum diterbitkan. Sebagai bahan yang relatif baru, data penelitian yang mendukung pengembangan beton kinerja tinggi juga meningkat. Namun, masih dibutuhkan penelitian

tambahan untuk memanfaatkan keunggulan dan memastikan kemampuan kinerjanya (ACI 363R-92, 1997). Salah satu komponen dasar untuk memproduksi beton kinerja tinggi (*High-Performance Concrete* – HPC) adalah semen portland jenis I (*Ordinary Portland cement* - OPC) yang diatur dalam SNI 15-2049-2004. Pada kenyataannya, semen yang beredar di pasaran Indonesia adalah jenis Semen Portland Pozolan (*Portland Pozzolana Cement*-PPC) sesuai SNI 15-0302-2004.

Pelat adalah elemen struktur datar dimana ketebalannya kecil jika dibandingkan dengan dimensi permukaannya. Pada bangunan atas jembatan yang paling sederhana, pelat berfungsi sebagai elemen penahan beban utama yang ditumpu langsung oleh bangunan bawah (ACI 343R-95, 1995). Pelat jembatan umumnya di desain sebagai pelat satu arah, sehingga dapat dianggap sebagai balok lebar dan defleksinya dihitung dengan metode defleksi balok (BMS, 1992). Keadaan batas layan (*Serviceability Limit State*) pada pelat dengan tulangan konvensional diterapkan untuk memastikan fungsi dan integritas struktur pelat pada kondisi beban layan (Alam, Lenormand, Loukili, & Regoin, 2010). Pada pengujian beton dengan kuat tekan f_c' antara 20 MPa hingga 50 MPa, jarak dan lebar retak beton meningkat sesuai dengan tebal efektifnya hingga $d = 300$ mm (Piyasena, 2002). Oleh karena itu penelitian retakan pada beton serat kinerja tinggi perlu difokuskan pada balok dengan tebal efektif kurang dari 300 mm atau pada pelat.

Beban transversal yang bekerja pada pelat beton menimbulkan tegangan tarik di bawah garis netral dan tegangan tekan pada sisi atas garis netral. Tegangan tarik ditahan oleh beton dan tulangan baja. Sedangkan tegangan tekan ditahan oleh beton saja. Penyaluran tegangan tarik terlaksana dengan baik jika terjadi lekatan antara beton dengan baja tulangan. Kuat lekat (*bond strength*) antara beton dan baja tulangan akan menentukan kinerja struktur pelat beton bertulang. Perilaku lekatan (*bond behavior*) dipengaruhi oleh tebal selimut beton, jarak tulangan, ukuran tulangan, penggunaan tulangan melintang, geometri tulangan, sifat-sifat beton, tegangan dan kuat leleh baja tulangan, kondisi permukaan batang tulangan, posisi perletakan tulangan, panjang penyaluran, dan konsolidasi beton kinerja tinggi (ACI 408R-03, 2003). Kuat lekat mempengaruhi struktur dengan dua cara: 1) Pada defleksi kemampulayanan serta lebar retak, dan 2) pada keadaan batas kapasitas rotasi di daerah sendi plastis (Ahmad, 2016). Kuat lekat hasil uji spesimen cenderung menunjukkan rentang yang besar. Hal ini disebabkan adanya perbedaan sifat bahan beton, seperti energi fraktur dan geometri batang tulangan. Data yang digunakan pada *Bond and development of straight reinforcing bars in tension* (ACI 408R-03, 2003) dibatasi pada spesimen beton dengan berat normal (*normal weight concrete*) yang kuat tekannya diperoleh menggunakan silinder

mengacu pada ASTM C39/C39M-03 (2003). Pengujian pada beton serat kebanyakan menggunakan uji *pullout*, dan serat berpengaruh pada kemampuan menahan beban saat terjadi keruntuhan spesimen uji. Serat akan mengubah kontribusi beton terhadap kuat lentur dan kuat lekat elemen struktur. Oleh karena itu diperlukan penelitian untuk menyediakan data sebelum menilai efek serat pada perilaku lekatan pada beton serat kinerja tinggi.

Saat terjadi keruntuhan lekat, bantalan tulangan ulir akan menyalurkan gaya antara tulangan ulir dan beton kinerja tinggi. Resultan gaya tekan menyebar ke beton di sekitar ulir pada sudut tertentu. Kemiringan gaya menciptakan kuat tarik melingkar di sekitar tulangan pada beton kinerja tinggi (Ahmad, 2016). Kuat tarik beton dalam desain biasanya diabaikan.

Baja tulangan dipersiapkan untuk menahan tegangan tarik di dalam elemen akibat beban yang bekerja (Carino & Clifton, 1995). Jika tegangan tarik yang terjadi melebihi kapasitas tarik beton kinerja tinggi, kegagalan tarik belah terjadi. Namun jika kapasitas tarik tidak tercapai, maka beton di sekeliling tulangan mulai hancur dan mengarah pada jenis keruntuhan *pullout* (Ahmad, 2016). Fraktur dan retak pada beton sebagian besar tergantung pada sifat tegangan bahan dan perilaku pasca-retak (Kwak & Filippou, 1990). Ukuran retak tergantung pada ketahanan bahan terhadap pertumbuhan retak, dalam hal ini tidak sama dengan kekuatan bahan dan bervariasi sesuai ukuran struktur (Alam et al., 2010).

Penambahan serat dalam matriks beton merupakan cara untuk meningkatkan kapasitas penyerapan energi dan ketahanan beton kinerja tinggi terhadap retakan. Serat yang sangat kecil dan tersebar dengan baik dapat mengontrol retakan mikro awal pada matriks beton dan menghasilkan deformabilitas yang sangat tinggi (G. Ferro, Tulliani, Jagdale, & Restuccia, 2014). Sasha Wang menggunakan serat baja lurus (*Dramix@Bekaert*) dan serat *polyethylene (PE) Spectra fiber 900 Honeywell* dalam penelitian *fiber-reinforced high-strength concrete (FRHSC)* dengan kuat tekan sekitar 80–90 MPa (Wang, Zhang, & Quek, 2012). Arah orientasi serat, mempengaruhi respon tarik dan lentur dari HPFRC. Serat baja yang telah dikembangkan untuk kebutuhan beton serat kinerja tinggi di antaranya adalah *Steel Fiber Dramix® 3D* (Bekaert, 2012). Untuk itu dalam penelitian ini akan dipelajari pengaruh penggunaan serat baja *Dramix® 3D* dengan spesifikasi seperti pada tabel 1.2 terhadap perilaku mekanik beton serat kinerja tinggi yang berupa perilaku lentur dan perilaku lebar retak pada pelat satu arah.

Tabel 1. 2 Sifat Material Dan Geometri Serat *Dramix® 3D*

No.	Uraian	Besaran
1	Tegangan tarik, $R_{m,nom}$	1.225 N/mm ² . Toleransi: $\pm 7,5\%$ Avg
2	Modulus Young's	± 210.000 N/mm ²
3	Panjang (l)	60 mm
4	Diameter (d)	0,75 mm
5	Aspek rasio (l/d)	80
6	Dosis minimum	10 kg/m ³

Sumber: (Bekaert, 2012)

Penelitian perilaku tarik dan lentur beton serat kinerja tinggi (*High Performance Fiber Reinforced Concrete* - HPFRC) dapat digunakan untuk mengembangkan model konstitutif retakan beton serat kinerja tinggi dalam menentukan orientasi arah serat (Shionaga, Walraven, Uijl, & Sato, 2006). Penggunaan serat baja sebagai penguat struktural diskrit dalam beton telah dieksplorasi dan bahkan direkomendasikan dalam beberapa peraturan beton. Banyak penelitian telah dilakukan pada perilaku fraktur beton bertulang dengan serat baja. Terdapat peningkatan kekuatan lentur dan ketangguhan dibandingkan dengan beton polos. Serat meningkatkan perilaku pasca-retak dengan memberikan tegangan penghubung retak dan dengan demikian memastikan pemindahan tegangan melintasi bagian yang retak. Beberapa faktor yang mempengaruhi pembentukan retak dan pertumbuhan adalah jenis serat, volume serat, distribusi dan orientasi serat di lokasi retak (Gali & Subramaniam, 2017). Jarak tulangan biasanya dibatasi untuk mengontrol retak. Lebar retak pada struktur sangat bervariasi. Lebar retak merupakan indikator yang baik dari keadaan struktur dan harus diamati untuk menentukan apakah perilaku struktur dan kekuatannya memuaskan. Namun, prediksi atau pengukuran yang akurat dari lebar retak dalam elemen beton struktural sulit untuk dicapai di lapangan (ACI 318M-14, 2014).

Respon tegangan-regangan tarik mendominasi kinerja beton serat yang diaplikasikan pada berbagai kondisi pembebanan. Beton serat digunakan secara luas dalam aplikasi infrastruktur karena peningkatan sifat mekaniknya seperti *fracture toughness*, daktilitas, durabilitas, pengontrolan lebar retak, kemampuan mereduksi *shrinkage* dan retak *thermal*, reduksi ketebalan pelat dan peningkatan spasi sambungan yang diijinkan (Mobasher, Bakhshi, & Barsby, 2014). Meski telah diterapkan beberapa metodologi untuk memenuhi persyaratan beton serat kinerja tinggi, tetap diperlukan pengembangan mengenai strategi yang paling sesuai untuk mengembangkan teknologi beton ini (Soltanzadeh, Barros, & Santos, 2015). Penelitian mengenai permasalahan penambahan bahan serat masih sangat dibutuhkan yang meliputi: 1) Pengembangan prosedur desain yang melibatkan sifat beton

serat baja (*Steel Fiber Reinforced Concrete* – SFRC) dalam elemen struktur yang dapat diadopsi oleh peraturan seperti ACI 318; 2) Pengembangan model numerik beton serat baja sesuai kondisi tegangan dan regangan; 3) Pengembangan model kerusakan bahan dan penurunan kekakuan struktural untuk memprediksi respons beton serat baja terhadap tegangan atau gelombang kejut; 4) Investigasi sifat-sifat daktilitas beton serat baja untuk aplikasi konstruksi; 5) Investigasi sifat-sifat fisik dan mekanik beton serat baja dengan menggunakan matriks beton berkekuatan tinggi; 6) Investigasi sifat mekanik *interface* dan mekanisme mikro lain yang ikut terlibat dalam masalah *pull-out* dari serat baja yang tidak sesuai dengan arah beban dan masalah serat baja ulir (ACI 544.1R-96, 1997).

Kontrol fraktur struktur adalah upaya terpadu para ahli untuk memastikan operasional struktur yang aman tanpa terjadinya kegagalan fraktur katastrofik. Dari berbagai model kegagalan struktural (tekuk, fraktur, deformasi plastis yang berlebihan), fraktur hanya ada satu. Fraktur akibat beban yang tidak terduga pada struktur yang tidak cacat jarang terjadi. Fraktur biasanya disebabkan oleh cacat struktur atau retak akibat beban layan "normal" berulang atau beban layan menerus (dimulai dari cacat atau konsentrasi tegangan) dan ukuran cacat tersebut tumbuh perlahan. Retak dan cacat akan merusak kekuatan struktur. Selama perkembangan retak berlanjut, kekuatan struktur menurun hingga menjadi sangat rendah, mengakibatkan beban layan tidak dapat ditahan lagi, dan terjadi fraktur. Kontrol fraktur dimaksudkan untuk mencegah fraktur karena cacat dan retak pada beban maksimum yang dialami selama masa operasional struktur. Alat matematika dalam analisis toleransi kerusakan ini disebut mekanika retakan atau *fracture mechanics* (Broek, 1989).

1.2 Rumusan Masalah

Perkembangan retak pada elemen beton bertulang merupakan proses yang kompleks. Tidak ada model yang dapat diterima secara universal untuk mengestimasi lebar retak dan jarak retak (Carino & Clifton, 1995). Persamaan yang digunakan untuk memperhitungkan lebar retak hingga saat ini juga masih terus berkembang dan menunjukkan perbedaan mendasar tentang asumsi perhitungan lebar retak. Beberapa peneliti lebar retak, lebih mempertimbangkan variabel karakteristik tulangan (f_s , E_s , ε_s) dan geometri beton atau baja tulangan (diameter ϕ , rasio modulus elastisitas n , rasio tulangan ρ , selimut beton c , tebal balok atau pelat h , tebal efektif beton d , jarak tulangan s , luas efektif beton A_e). Hasil penelitian ini juga diterapkan pada peraturan beberapa negara, seperti Amerika ACI 224R-01, ACI 318M-14, Mesir ECP 203-2007, dan Indonesia SNI 2847:2013. Sementara Piyasena (2002), Allam, Shoukry, Rashad, & Hassan (2012), Stang & Aarre (1992), serta

Borosnyói & Snóbli (2010) meneliti pengaruh variabel karakteristik beton khususnya kuat tekan beton, dan lokasi sumbu netral di samping variabel sebelumnya. Beberapa peraturan yang melibatkan variabel karakteristik beton, diantaranya adalah *Eurocode2: Design of Concrete Buildings* (2014), *Australian Standard AS-3600* (Patrick & Wheeler, 2000), *The CEB/FIP Model Code* (CEB-FIP, 1993), *British standards* (BS 8110-1:1997, 1999), *Indian Standards* (IS 456:2000), *Hongkong Standards* (*The Building Departement* (BD), 2013), dan *New Zealand Standard* (NZS 3101, 2006). Secara umum, lebar retak yang dibahas pada semua peraturan masih pada kondisi beton dengan kuat tekan normal (*normal strength concrete*) atau kurang dari 50 MPa, meskipun beberapa peneliti juga telah meneliti lebar retak untuk beton dengan kuat tekan hingga 82,6 MPa yang masih termasuk pada kategori beton dengan berat normal (*normal weight concrete*).

Retak pada beton memicu reduksi kekakuan lentur balok atau pelat dan dapat menyebabkan deformasi yang besar dan kehilangan kemampuan. Pada kondisi layanan normal, beton yang berada di antara retakan primer dapat menahan tegangan tarik, diakibatkan oleh transfer gaya dari tulangan tarik ke beton melalui lekatan (Xu, Zhu, Castel, & Gilbert, 2018). Banyak variabel yang mempengaruhi lebar dan jarak retak lentur pada elemen beton bertulang, termasuk besar dan lamanya pembebanan; kuantitas, orientasi, dan distribusi baja tulangan; selimut beton untuk tulangan; selip antara tulangan tarik dan beton di sekitar celah (yang tergantung pada karakteristik ikatan tulangan); sifat deformasi beton (termasuk sifat muai dan susutnya); dan dimensi elemen. Sejumlah pendekatan deterministik teoretis dan semi-empiris tersedia untuk menentukan lebar retak dan jarak retak, tetapi, dalam praktiknya, ada variasi yang cukup besar dari retakan ke retakan karena variasi acak dalam sifat-sifat beton (Gilbert, 2009).

Permasalahan retakan pada struktur beton bertulang dapat dievaluasi dari diagram beban dan lebar retak pada pengujian lentur. Terdapat beberapa metode untuk menjabarkan permasalahan retak, yaitu metode konvensional berupa teori *bond-slip* yang dikembangkan oleh Hognestad, teori mekanika retakan elastis linier (*linear elastic fracture mechanics*) yang banyak dibahas oleh Carpinteri, serta pengembangan secara empirik dari hasil pengujian (Suseno, 2018). Dalam pembahasan mengenai pelat lentur tiga titik yang ditumpu sederhana dan dibebani di tengah bentang, Carpinteri mengembangkan pemodelan persamaan untuk menganalisis lebar retak mengacu pada teori mekanika retakan dengan mempergunakan parameter faktor intensitas tegangan (K_I) dan *crack opening displacement* (w). Persamaan yang dikembangkan berlaku untuk kedalaman retak relatif ($\xi = a/h$) dengan

nilai $0 \leq \xi \leq 0,7$ (Carpinteri, 1986). Model persamaan tersebut terus dikembangkan oleh para peneliti dalam mempelajari efek ukuran terhadap respon lentur elemen beton bertulang (Carpinteri, Ferro, & Ventura, 2003), penulangan minimum pada ketidak stabilan material dan struktur beton (Giuseppe Ferro, Carpinteri, & Ventura, 2007), serta dalam mempelajari hukum perambatan retak (Ciavarella, Paggi, & Carpinteri, 2008). Nilai batasan ini tentunya perlu dinilai kembali untuk beton serat kinerja tinggi, yang memungkinkan ketebalan pelat menjadi lebih tipis, sehingga nilai kedalaman retak relatif ξ dapat melebihi 0,7. Hal ini penting, mengingat pengujian yang telah dianalisis dan dibahas menggunakan persamaan yang dikembangkan oleh Carpinteri kebanyakan berlaku untuk kategori beton mutu normal (*normal strength concrete*) sebagaimana terlihat pada penelitian mengenai kinerja pelat beton ringan (Suseno, Soehardjono, Wardana, & Rachmansyah, 2018) dan penelitian mengenai beban berulang pada pelat beton pracetak (Soehardjono, Raka, & Suprobo, 2006).

Dari latar belakang dan uraian di atas, dapat dirumuskan beberapa identifikasi permasalahan yang muncul dalam penelitian perilaku lentur dan lebar retak beton serat kinerja tinggi (HPFRC) pada pelat satu arah, yaitu: 1) Bagaimanakah karakteristik fisik dan mekanik bahan penyusun beton, yaitu semen, agregat, air, dan bahan tambahan (superplastisizer, silika fume, serat baja, dll) yang dibutuhkan untuk mendapatkan beton serat kinerja tinggi sesuai kriteria dalam ACI 363.2R-11, 2011; 2) Bagaimanakah sifat-sifat karakteristik serat yang sesuai untuk beton serat kinerja tinggi; 3) Bagaimanakah proporsi rancangan campuran (*mix design*) beton serat kinerja tinggi dan proses pengujian yang tepat untuk memperoleh kinerja beton yang diharapkan; 4) Bagaimanakah sifat fisik dan mekanik beton serat kinerja tinggi; 5) Bagaimanakah metode pencampuran, pengadukan dan penghamparan yang dapat menjamin terdistribusinya matriks bahan penyusun beton serat kinerja tinggi; 6) Bagaimanakah model pengujian struktur pelat beton serat kinerja tinggi yang efektif; 7) Bagaimanakah bekerjanya tegangan tarik dan tekan pada pelat beton serat kinerja tinggi jika dianalisis dengan metode elemen hingga; 8) Bagaimanakah model diagram lentur yang terjadi pada pelat beton sejak awal pembebanan hingga runtuh; 9) Bagaimanakah hubungan antara tegangan lekat (*bond stress*) pada beton dan baja tulangan dengan model diagram lentur beton serat kinerja tinggi; 10) Bagaimanakah hubungan parameter kuat lentur dan parameter kuat lekat beton terhadap perilaku retak maksimum pelat beton serat kinerja tinggi satu arah; 11) Bagaimanakah model persamaan lebar retak maksimum yang dianalisis menggunakan teori mekanika retakan elastis linier yang berlaku bagi beton serat kinerja tinggi pada elemen pelat satu arah khususnya apabila diketahui memiliki nilai $\xi \geq 0,7$. Oleh karena itu dalam penelitian ini dipandang perlu untuk

mempelajari tentang permasalahan beton serat kinerja tinggi, khususnya menyangkut perilaku lentur, perilaku retak dan prediksi lebar retak beton serat kinerja tinggi (HPFRC) yang terjadi akibat beban monotonik pada pelat satu arah.

Berdasarkan pada identifikasi permasalahan tersebut di atas, pada penelitian perilaku lentur dan lebar retak beton serat kinerja tinggi (HPFRC) pada pelat satu arah, dirumuskan permasalahan yang dipandang perlu untuk dilaksanakan penelitiannya, yaitu:

1. Bagaimanakah mewujudkan proporsi campuran beton serat kinerja tinggi dengan kondisi bahan dan cara pelaksanaan pencampuran beton yang umum dilaksanakan di Indonesia. Apabila dalam mewujudkan dan memenuhi persyaratan beton serat kinerja tinggi ternyata perlu ada kekhususan metode pelaksanaan, bagaimanakah seharusnya hal itu dilaksanakan.
2. Bagaimanakah perilaku lentur dan perilaku lebar retak pelat beton serat kinerja tinggi satu arah yang dipengaruhi oleh kuat lekat (*bond stress behavior*) antara beton serat kinerja tinggi dan baja tulangan, apabila diberi perlakuan berupa variasi komposisi serat baja.
3. Bagaimanakah model persamaan untuk memprediksi lebar retak maksimum dalam mekanika retakan elastis linier yang memperhitungkan parameter perilaku lekatan (*bond behavior parameter*) antara beton dan baja tulangan serta parameter perilaku lentur (*flexural behavior parameter*) beton serat kinerja tinggi pada pelat satu arah.

1.3 Batasan Masalah

Dalam upaya mewujudkan pencapaian hasil penelitian perilaku lentur dan lebar retak beton serat kinerja tinggi (HPFRC) pada pelat satu arah, ditentukan batasan penelitian untuk dilaksanakan, yaitu:

1. Penelitian dilakukan pada benda uji pelat beton serat kinerja tinggi dengan kategori beton kinerja tinggi kelas I atau f_c' antara 50 MPa - 75 MPa.
2. Agar kriteria pelat satu arah $l_y/l_x \geq 2$ terpenuhi, pelat dicetak dengan dimensi panjang 2 m dan lebar 0,9 m serta ketebalan 0,08 m. Penulangan memanjang menggunakan tulangan baja ulir D-10 sebagai tulangan utama dan penulangan melintang baja polos dengan diameter ϕ -8 mm berfungsi sebagai tulangan pengikat.
3. Dalam penelitian ini digunakan serat baja *Dramix® 3D*.
4. Penelitian tidak memeriksa tatanan mikrostruktur beton menggunakan *X-Ray*.
5. Penelitian tidak menguji sifat kimia bahan maupun perubahan sifat kimia beton.

6. Pembebanan yang diaplikasikan adalah beban monotonik dan disalurkan menggunakan pendistribusi beban berupa balok IPE-100 yang diletakkan di tengah bentang pelat.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian perilaku lentur dan lebar retak beton serat kinerja tinggi (HPFRC) pada pelat satu arah ini bertujuan untuk:

1. Mengembangkan metode untuk mencapai kualitas beton serat kinerja tinggi melalui rekayasa proporsi bahan penyusun dan menjabarkan kekhususan pembuatan beton serat kinerja tinggi dengan menggunakan bahan penyusun beton di Indonesia.
2. Mengidentifikasi perilaku lentur dan perilaku retak beton serat kinerja tinggi pada pelat satu arah yang dipengaruhi oleh pengaruh lekatan (*bond effect*) antara beton serat kinerja tinggi dan baja tulangan yang diberi perlakuan berupa variasi komposisi serat baja.
3. Mengembangkan persamaan untuk memprediksi lebar retak maksimum berdasar teori mekanika retakan elastis linier yang mempertimbangkan pengaruh lekatan (*bond effect*) antara beton dan baja tulangan serta parameter lentur beton serat kinerja tinggi pada pelat satu arah.

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian perilaku lentur dan lebar retak beton serat kinerja tinggi (HPFRC) pada pelat satu arah ini diharapkan dapat menghasilkan manfaat berupa:

1. Memberi masukan tentang proporsi campuran beton serat kinerja tinggi dengan menggunakan bahan alam konvensional yang ada di Indonesia dan metode pelaksanaan yang sesuai, sehingga kualitas kinerja yang direncanakan dapat dicapai.
2. Hasil penelitian ini dapat digunakan untuk mewujudkan struktur pelat beton serat kinerja tinggi yang memiliki kekuatan dan durabilitas tinggi, sehingga mengurangi berat struktur secara signifikan, namun memenuhi kinerja yang diharapkan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Perkembangan teknologi beton dalam dunia konstruksi terus meningkat, baik kualitas maupun kuantitasnya. Teknologi beton kinerja tinggi (*High Performance Concrete* – HPC) pada konstruksi jalan, jembatan, bandara ataupun gedung mengalami evolusi sejak tahun 1980, sebagaimana terlihat pada Lampiran 1. Pengenalan konsep beton kinerja tinggi dimulai pada tahun 1980, diikuti dengan kegiatan pengumpulan dan review literatur antara tahun 1974-1989 untuk mendefinisikan tentang sifat mekanik beton kinerja tinggi. Sejak tahun 1993 mulai dilaksanakan implementasi beton kinerja tinggi pada infrastruktur jembatan melalui program nasional di Amerika Serikat (NCHRP Synthesis 441, 2013). Sejak saat itu pengaplikasian teknologi beton kinerja tinggi ini terus berkembang pada berbagai macam proyek jembatan, bandara dan pada instalasi nuklir di berbagai negara.

Beton serat kinerja tinggi sebagai beton kekuatan tinggi, diperoleh dari reduksi drastis rongga akibat penurunan ukuran agregat. Beton ini sangat menjanjikan untuk merealisasikan struktur besar. Namun beton ini memiliki perilaku yang sangat getas. Serat akan bekerja sebagai perkuatan sekunder untuk menyalurkan beban pada daerah retak (mikro ataupun makro) dari matrik semen. Tulangan memanjang digunakan sebagai perkuatan utama ketika retak makro terbentuk dan berkembang sepanjang penampang melintang. Penambahan serat tercatat meningkatkan puncak diagram tegangan (juga puncak regangan), yang berarti meningkatkan daktilitas beton (Ferro, 2002).

2.1 Sifat Fisik, Mekanik, dan Rheologi Bahan Beton Serat Kinerja Tinggi

Dari pendekatan mekanika retakan, beton merupakan bahan nonhomogen yang memiliki tiga fase, yaitu pasta semen terhidrasi, daerah transisi antara agregat dan pasta semen terhidrasi, dan agregat. Guna mencapai kualitas beton kinerja tinggi, dapat dilakukan upaya: 1) Meningkatkan kekuatan pasta semen terhidrasi, melalui perbaikan pada tingkat mikrostruktur pasta semen terhidrasi; 2) Memperkuat daerah transisi antara pasta semen terhidrasi dengan agregat; 3) Memilih agregat yang memiliki kuat tekan terbaik; 4) Memahami faktor-faktor fisik, kimia dan faktor lain yang mempengaruhi rheologi campuran

beton; 5) Mewujudkan rasio kadar air/pengikat yang rendah, tanpa mengganggu workabilitas beton (Aitcin, 2004).

2.1.1 Semen sebagai bahan pengikat beton kinerja tinggi

Semen Portland (SNI 15-2049-2004) adalah semen hidrolis yang diperoleh dengan menggiling terak semen Portland, yang merupakan kalsium silikat bersifat hidrolis, bersama dengan bahan tambahan kristal senyawa kalsium sulfat. Semen Portland Pozolan (SNI 15-0302-2004) adalah semen hidrolis berupa campuran homogen antara semen Portland dengan pozolan halus, dihasilkan dengan menggiling klinker semen Portland dan pozolan, dengan kadar pozolan 6% - 40% dibanding massa semen Portland pozolan. Persyaratan komposisi kimia dan sifat fisik kedua jenis semen tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2.

Tabel 2. 1 Persyaratan Kimia Semen Portland: Tipe I (PC) dan Pozolan (PPC)

	Tipe I	Pozolan (PPC)
MgO, maks	6,0	6,0
SO ₃ , maks (%)		4,0
Jika $C_3A \leq 8,0$	3,0	
Jika $C_3A > 8,0$	3,5	
Hilang pijar, maks.	5,0	5,0
Bagian tak larut, maks.	3,0	

Sumber: SNI 15-2049-2004 dan SNI 15-0302-2004

Ketika membuat beton kinerja tinggi, kinerja akhir semen tergantung pada cara di mana perilaku rheologi dan perkembangan kekuatan dapat dioptimalkan. Terdapat persyaratan yang saling bertentangan tentang kehalusan optimum semen:

1. Dari sudut pandang kekuatan, semakin halus semen akan lebih baik, karena fase silikat lebih cepat terwujud dan secara menyeluruh akan terjadi kontak dengan air;
2. Dari sudut pandang rheologi, semen yang lebih halus akan lebih reaktif, sehingga lebih cepat terjadi proses pengkristalan.

Kinerja rheologi dan kekuatan semen menjadi isu krusial untuk meningkatkan kuat tekan beton kinerja tinggi. Perbedaan komposisi semen dapat menghasilkan perbedaan sangat besar pada rasio air/semen sangat rendah dengan rentang antara 0,20 hingga 0,30 (Aitcin, 2004:165). Jika semen Portland tidak berperilaku memuaskan, bahan perekat tambahan harus dipertimbangkan untuk memperbaiki situasi, sebelum menggunakan *retarder* untuk mengontrol masalah kehilangan slam atau mengganti Semen Portland yang lebih efisien (Aitcin, 2004:169). Mayoritas penelitian yang dilakukan pada beton kinerja tinggi menggunakan Semen Portland Tipe I, namun pada kenyataannya, jenis Semen Portland ini tidak lagi beredar di pasaran di Indonesia. Semen yang beredar saat ini adalah

dari tipe semen Portland pozolan (PPC). Oleh karena itu diperlukan penyesuaian proporsi bahan yang digunakan pada proses perencanaan campuran beton kinerja tinggi, agar hasil yang didapat memenuhi kriteria kuat tekan dan persyaratan kinerja lainnya.

Tabel 2. 2 Persyaratan Fisik Semen Portland: Tipe I (PC) dan Pozolan (PPC)

No.	Uraian	Tipe Semen Portland	
		Tipe I	Pozolan
1	Kehalusan: Uji permeabilitas udara, m ² /kg Dengan alat: Turbidimeter, min Blaine, min	160 280	- 280
2	Kekekalan dengan autoclave: Pemuaian, maks. (%) Penyusutan, maks. (%)	0,80 -	0,80 0,20
3	Kuat tekan: Umur 1 hari, (kg/cm ²), min Umur 3 hari, (kg/cm ²) min Umur 7 hari, (kg/cm ²) min Umur 28 hari, (kg/cm ²) min	- 125 200 280	- 125 200 250
4	Waktu pengikatan (metode alternatif) dengan alat Gillmore Awal, (menit), min Akhir, (menit), maks Vicat Awal, (menit), min Akhir, (menit), maks	60 600 45 375	- - 45 7x60
5	Pengikatan semu Penetrasi akhir, min, (%)	-	-
6	Kandungan udara dalam mortar, maks, (% vol.)	-	12
7	Panas hidrasi, maks. Umur 7 hari, (kal/g) Umur 28 hari, (kal/g)	- - -	- 70 80

Sumber: SNI 15-2049-2004 dan SNI 15-0302-2004

2.1.2 Pasir dan kerikil sebagai agregat beton kinerja tinggi

Agregat beton, terdiri dari pasir dan kerikil, mewakili kerangka butir beton. Semua rongga dalam kerangka ini harus diisi dengan pasta pengikat. Jumlah agregat beton sekitar 80% dari berat beton atau 70% dari volume beton. Penggunaan ukuran dan kualitas agregat yang optimal akan meningkatkan kualitas beton. Agregat dapat diperoleh secara alami (*fluvial* atau *glacial*) atau dari produk industri seperti agregat ringan atau agregat daur ulang. Untuk beton berkualitas tinggi agregat harus dibersihkan dan diatur gradasinya melalui proses mekanis dalam industri beton seperti penghancuran, pencucian, penyaringan dan pencampuran secara bersama-sama. Agregat beton harus memiliki ikatan yang kuat dengan pasta semen pada saat mengeras, tidak boleh mengganggu pengerasan semen, dan tidak memiliki efek negatif pada daya tahan beton (Schlumpf, Bicher, & Schwoon, 2013).

Beberapa penelitian beton kinerja tinggi menggunakan agregat sebagaimana terlihat pada Tabel 2.3. Terlihat bahwa ukuran maksimum butiran agregat memberikan pengaruh terhadap kinerja beton yang dihasilkan. Pasir yang digunakan berupa pasir silika atau pasir sungai, sedangkan agregat kasar menggunakan batu pecah dengan diameter antara 5 mm hingga 20 mm. Untuk mencapai kinerja kuat tekan yang tinggi, sebaiknya digunakan agregat kasar berukuran maksimum 10 mm.

Tabel 2.3 Rangkuman Karakteristik Agregat pada Penelitian Beton Kinerja Tinggi.

Peneliti	Kinerja beton yang dihasilkan	Jenis dan asal agregat	Karakteristik agregat
Ayub, Shafiq, & Nuruddin (2014)	Kuat tekan: 65,08 – 74,16 MPa Modulus elastisitas: 40,76 – 42,54 GPa. Kuat tarik belah: 5,26-6,0 MPa.	Pasir sungai Batu pecah dengan dua ukuran.	<i>fineness modulus</i> = 3,55 Agregat 1: < 10 mm (3/8") Agregat 2 : 10 - 20 mm (3/4")
Aulia & Rinaldi (2015)	Kuat tekan: 64,43 MPa Kuat tarik belah: 6,34 MPa.	Pasir sungai	D_{maks} 4,76 mm
Shannag, Abu-Dyaa, & Abu-Farsakh (2005)	Kuat tekan: 75 MPa	Batu pecah (a) Pasir silika (b) Lime stone <i>Crushed limestone</i>	D_{maks} = 15,9 mm (a) D_{maks} = 0.2 mm, BSG = 2.60, <i>fineness modulus</i> = 2.66 (b) BSG = 2.65, <i>fineness modulus</i> = 3.10 D_{maks} = 12.5 mm, BSG (bulk specific gravity) = 2.60
Habel, Viviani, Denarié, & Brühwiler (2006)	Kuat tekan =168 MPa Modulus secan =48 GPa <i>Tensile strength</i> = 11 MPa	<i>Coarse aggregate</i>	D = 0.5 - 4 mm
Denneman, Wu, Kearsley, & Visser (2011)	Kuat Tekan = 137,2 MPa Modulus Elastisitas = 69,2 GPa <i>Tensile strength</i> = 6,56 MPa	<i>Coarse aggregate</i> <i>Fine Aggregate</i>	D_{maks} = 6,7 mm D_{maks} =4,75 mm

Pada beton kinerja tinggi, pasta semen terhidrasi dan daerah transisi dapat dibuat begitu kuat, sehingga jika agregat kasar tidak cukup kuat, akan menjadi *link* terlemah beton. Untuk mendapatkan partikel agregat ideal yang bebas kerusakan, cara peledakan dan penghancuran bukanlah cara yang baik. Untuk itu diperlukan pemilihan batuan bertekstur halus yang kuat dan mengandung jumlah retak mikro minimum. Batu ini bisa berasal dari bahan fase tunggal, seperti batu gamping, kapur dolomit dan syenite, atau bahan fase jamak (*polyphasic*) seperti granit. Batuan yang mengandung bidang retakan atau partikel sangat lapuk harus dihindari (Aitcin, 2004:95).

2.1.3 Silika fume dalam pembuatan beton kinerja tinggi

Silika fume merupakan bahan yang sangat reaktif, yang digunakan dalam jumlah relatif sedikit untuk mengembangkan sifat-sifat beton. Lebih dari 95% partikel silika fume berukuran kurang dari 1 μ m. Keuntungan dari penambahan silika fume adalah berupa

perubahan pada sifat mikrostruktur beton. Silika fume bukan berfungsi sebagai pengganti bahan semen, namun sebagai bahan untuk meningkatkan *property* dari beton (Holland, 2005). Beberapa negara telah menetapkan standar teknis bagi penggunaan silika fume sebagaimana terlihat pada Tabel 2.4 dan Tabel 2.5

Tabel 2. 4 Standar Teknis Silika Fume di Amerika, Eropa, Kanada, dan Jepang

	Amerika	Eropa	Kanada	Jepang
Persyaratan kimia dan fisik yang ditentukan	ASTM C1240-04	EN 13263: 2005	CAN/CSA A23.5-98	JIS A 6207 2000
SiO ₂ (%)	>85,0	>85	>85	>85
SO ₃ (%)		<2,0	<1,0	<3,0
CI (%)		<0,3		<0,1
Free CaO (%)		<0,3		<0,1
MgO (%)				<5,0
Free Si (%)		<0,4		
Available alkalis (Na ₂) equivalent, %	Report			
Moisture (%)	<3,0			<3,0
Loss on Ignition (%)	<6,0	<4,0	<6,0	<5,0
Specific surface (m ² /gram)	>15	15-35		>15
Bulk density, undensified	Report			
Pozzolanic Activity Index (%)	>105@7d, accel. curing	>100 @ 28d, std curing		>95@7d >105%28d, std curing
Retained on 45 micron sieve (%)	<10		<10	
Variation from average on 45 micron sieve (%-points)	<5			
Density (kg/m ³)	Report			
Autoclave expansion (%)			<0,2	
Foaming			No foam	
Dry mass (%_points deviation from declared in slurry)		< 2		
Water requirement ratio (%)				

Sumber: Shanghai Topken Silica Fume Co. Ltd (2011)

Tabel 2.5 Standar Teknis Silika Fume di China, Brazilia, Korea, Vietnam, dan India

	China	Brazilia	Korea	Vietnam	India
Persyaratan kimia dan fisik yang ditentukan	GB/T18736-2002	NBR 13956:1997	KS F 2567 2003	TCXDVN 311-2003	IS 15388:2003
SiO ₂ (%)	>85	>85	>85	>85	>85,0
SO ₃ (%)			<3,0		
CI (%)	<0,2		<0,3		
Free CaO (%)					
MgO (%)			<5,0		
Free Si (%)					
Available alkalis (Na ₂) equivalent, %		<1,5			<1,5
Moisture (%)	<3,0	<3,0		<3,0	<3,0
Loss on Ignition (%)	<6,0	<6,0	<5,0	<6,0	<4,0
Specific surface (m ² /gram)	>15		>15		>15
Bulk density, undensified					
Pozzolan Activity Index (%)	>85@28d, std curing		>95@7d, accel. curing	>85@7d	>85,0@7d 27°C curing
Retained on 45 micron sieve (%)		<10	<5,0	<10	<10
Variation from average on 45 micron sieve (%-points)					<5
Density (kg/m ³)					
Autoclave expansion (%)					
Foaming					
Dry mass (% points deviation from declared in slurry)			< 2		
Water requirement ratio (%)	<125				

Sumber: Shanghai Topken Silika Fume Co. Ltd (2011)

Warna silika fume berkisar dari terang ke warna abu-abu gelap. Keberadaan silika fume dalam beton segar berfungsi mengurangi *bleeding* dan memperbesar sifat kohesif. Silika fume juga mempercepat hidrasi semen pada tahap awal. Pada beton yang telah mengeras, partikel silika-fume meningkatkan kemasn bahan padat dengan mengisi ruang antara butir semen dengan cara seperti semen mengisi ruang antara partikel halus-agregat, dan agregat halus mengisi ruang antara partikel agregat kasar dalam beton (ACI 234R-96, 2006). Sifat fisik silika fume ditunjukkan pada Tabel 2.6.

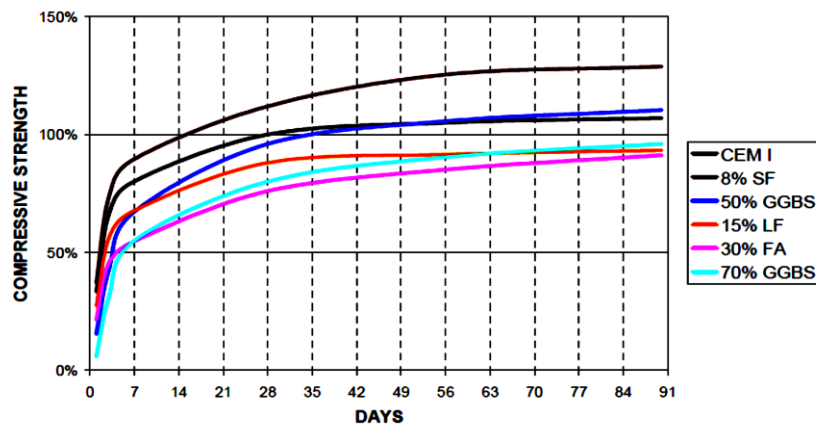
Tabel 2.6 Sifat Fisik Silika Fume

Ukuran partikel	< 1µm
Bulk density: (baru-produksi)	130 – 430 kg/m ³
(dipadatkan)	480 – 720 kg/m ³
Berat jenis	2,2
Luas permukaan	15.000 – 30.000 m ² /kg

Sumber: Holland (2005:16)

Untuk berat 15% silika fume berbentuk bubuk kering padat dengan lebih dari 90% massanya terdiri dari silikon dioksida amorf yang menggantikan semen, terdapat sekitar dua juta partikel silika fume untuk setiap butir semen Portland dalam campuran beton (Cohen, Olek, & Dolch, 1990). Penelitian tentang pengaruh ukuran partikel primer dan ukuran aglomerat dari silika amorf yang berbeda pada beton kinerja tinggi (HPC) menunjukkan bahwa dispersi silika dalam ukuran partikel primer atau aglomerat terkecil diperlukan untuk perbaikan lebih lanjut dari kuat tekan beton berkinerja tinggi (Oertel, Hutter, Tänzer, Helbig, & Sextl, 2013).

Gambar 2.1. menunjukkan indikasi perkembangan kekuatan beton jangka panjang, di mana beton dipersyaratkan untuk mencapai kekuatan tertentu pada umur 28-hari. Beton yang mengandung *blast furnace slag* (GGBS), abu terbang dan silika fume umumnya menunjukkan peningkatan kekuatan yang ultimit.

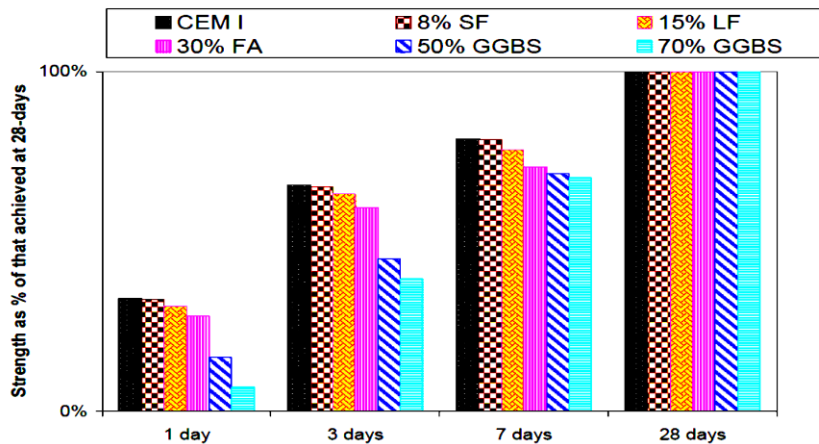


CEM1 = beton dibuat dengan 100% OPC (*Original PC*); SF = *Silika fume*

Gambar 2.1 Indikasi perkembangan kekuatan beton jangka panjang (w/c rasio tetap)

Sumber: King (2012:7)

Gambar 2.1 menunjukkan indikasi perkembangan kekuatan, pada w/c rasio tetap, di mana beton yang mengandung abu terbang batu kapur halus atau GGBS sebagai pengganti semen umumnya memiliki kekuatan lebih rendah pada umur 28 hari, sementara dengan silika fume dapat memberikan peningkatan kekuatan. Kekuatan awal beton yang diperoleh dengan bahan semen seperti slag dan abu terbang, terlihat lebih lambat dari beton CEM I, terutama pada prosentase yang lebih tinggi dan ini kadang-kadang memerlukan perbaikan bekisting, terutama pada suhu yang lebih rendah (King, 2012). Dari pengujian menggunakan bahan perekat berupa semen Portland (*Original PC*), atau yang dicampur dengan silika fume (SF), *blast furnace slag* atau GGBS, butiran kapur halus (*limestone fines*, LF); dan abu terbang (= *fly ash*, FA), Gambar 2.2 menunjukkan pengaruh penggunaan butiran mikro dalam menentukan kekuatan awal atau kekuatan jangka panjang beton kinerja tinggi.



GGBS = blast furnace slag; LF = limestone fines; FA = fly ash

Gambar 2. 2 Indikasi kekuatan awal sebagai persentase terhadap kekuatan beton 28 hari.

Sumber: King (2012:9)

2.1.4 Superplastisizer sebagai pereduksi kadar air

Superplastisizer komersial dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kategori menurut basis kimia alaminya, yaitu: 1) *Sulfonated salts of polycondensate of naphthalene and formaldehyde*, atau *naphthalene superplasticizers*; 2) *Sulfonated salts of polycondensate of melamine and formaldehyde* atau *melamine superplasticizers*; 3) *Lignosulfonates*; 4) *Polyacrylates* (Aitcin, 2004); serta 5) *polycarboxylate copolymers* (Sika, 2016).

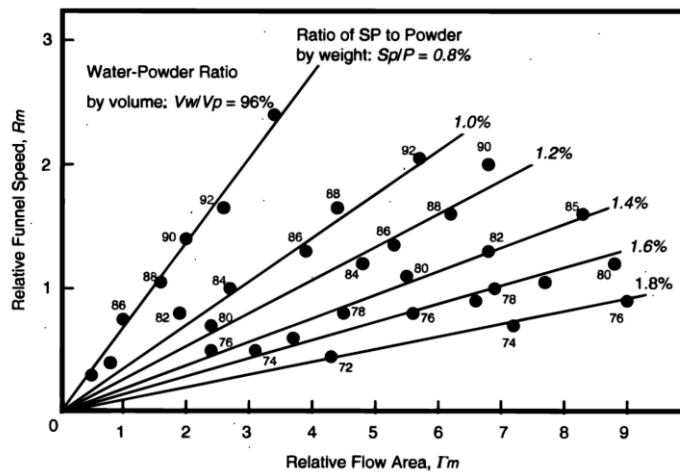
Rasio kecepatan aliran dari funnel ke area aliran mortar dengan jumlah superplastisizer yang tetap, hampir konstan, tidak tergantung pada rasio air-powder. Jumlah superplastisizer yang lebih tinggi mengakibatkan rasio kecepatan aliran yang lebih rendah. Hubungan antara jumlah superplastisizer (Sp/P) dan kemampuan mengalir dan viskositas mortar (*powder* menggunakan *Moderate-heat Cement* (MC) dan kandungan pasir 40 % volume mortar) ditunjukkan pada Gambar 2.3. Penggunaan superplastisizer yang lebih banyak akan menghasilkan inklinasi garis Γm - Rm yang lebih rendah. Okamura dkk (1996), mengajukan metode pengujian mortar, indeks kemampuan mengalir (Γm) dan viskositas (Rm) dengan persamaan:

$$\Gamma m = (r_1 r_2 - r_0^2) / r_0^2 \quad (2-1)$$

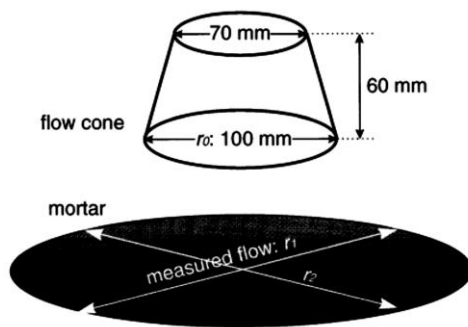
dengan r_1 , r_2 adalah ukuran diameter aliran dan r_0 adalah diameter aliran *cone* sebagaimana terlihat pada Gambar 2.4a.

$$Rm = 10/t \quad (2-2)$$

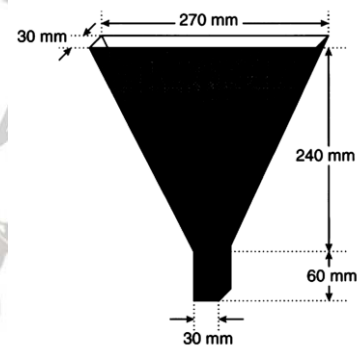
dengan t adalah waktu terukur (detik) mortar untuk mengalir melalui *funnel* sebagaimana terlihat pada Gambar 2.4b.



Gambar 2.3 Diagram jumlah superplastisizer, kemampuan aliran dan viskositas mortar.
Sumber: Ouchi et al. (1996)



a. Uji aliran mortar



b. Uji funnel mortar

Gambar 2.4 Pengujian diameter dan kemampuan mengalir mortar beton
Sumber: Ouchi et al. (1996)

2.1.5 Penambahan serat dalam matriks beton

Penambahan serat dalam matriks beton banyak dilakukan para peneliti untuk meningkatkan kinerja beton keras yang dihasilkan. Terdapat berbagai jenis serat yang terdapat di alam, baik secara alami, seperti serat tali rami atau ijuk, serta serat buatan dari bahan *polyethylene* maupun *fiberglass*. Di samping itu juga terdapat serat yang terbuat dari logam, yaitu serat baja berkait atau serat baja bergelombang. Beberapa jenis serat tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.5.

Kaïkea et al. (2014) melakukan penelitian sifat mekanis dan perilaku pasca retak beton serat kinerja tinggi dengan variasi pada kandungan volume serat dan tipe mineral tambahan. Evaluasi dilakukan terhadap perilaku tekan, tarik lentur, dan sifat susut balok serat kinerja tinggi. Puncak kekuatan lentur beton polos ditingkatkan dengan kehadiran serat. Dengan

fraksi volume 2% dari serat, kekuatan lentur meningkat sebesar masing-masing 49% dan 53% untuk silika fume dan komposisi berbasis terak.



a. Serat Polyethylene



b. Fiberglass



c. Serat baja dengan kait ujung



d. Serat sabut kelapa



e. Serat tali rami/ijuk



f. Serat baja bergelombang

Gambar 2. 5 Berbagai jenis serat yang telah dijadikan bahan penelitian sebagai bahan campuran matriks beton

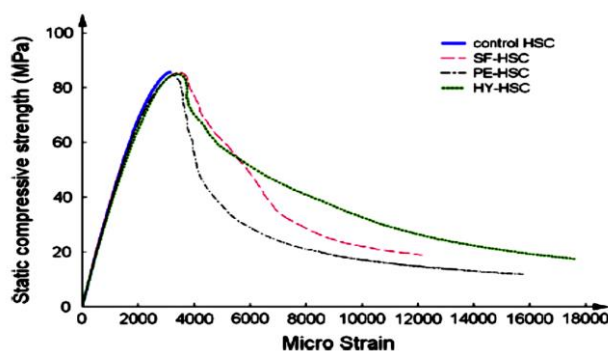
Wang et al. (2012) menggunakan serat baja lurus (serat baja kawat karbon tinggi lurus, Dramix®, Bekaert, Belgia Pte, Ltd), serat polyethylene (PE) (Kekuatan-tinggi, serat polyethylene ringan, Spectra fiber 900 Honeywell), atau kombinasi dari keduanya dalam penelitian *fiber-reinforced high-strength concrete* (FRHSC) dengan kuat tekan sekitar 80–90 MPa dan sifat mereka dirangkum dalam Tabel 2.7. Serat baja memiliki kekuatan tarik yang sama tetapi modulus elastisitas yang lebih tinggi daripada serat PE. Kedua jenis serat memiliki panjang yang sama, tapi diameter yang berbeda. Serat PE yang lebih tipis dengan aspek rasio yang lebih tinggi dari serat baja.

Tabel 2. 7 Sifat-sifat Serat Baja dan Serat Polyethylene

Jenis serat	Panjang (mm)	Diameter (μm)	Aspek rasio (panjang/diameter)	Modulus Young's (Gpa)	Kuat Tarik (MPa)
Steel	13	160	81	200	2500
Polyethylene	12	39	308	66	2610

Sumber: Wang et al. (2012)

Empat jenis beton dipelajari termasuk HSC polos, beton dengan serat baja 0,5% (SF-HSC), beton dengan serat polyethylene 0,5% (PE-HSC), dan beton dengan 0,5% baja dan 0,5% serat PE (HY-HSC). Berdasarkan hasil eksperimen, serat baja lebih efisien dalam peningkatan ketangguhan beton kekuatan tinggi dibandingkan serat PE. Meningkatkan kandungan serat dan kombinasi dari serat baja dan PE semakin meningkatkan ketangguhan FRHSC. Ketangguhan beton berdasarkan luasan di bawah diagram penuh tegangan regangan meningkat dengan laju regangan. Untuk FRHSC, ketangguhan berada dalam urutan menurun dari HY-HSC > SFHSC > PE-HSC pada tingkat regangan yang diberikan sebagaimana terlihat pada Gambar 2.6. (Wang et al., 2012).



Gambar 2. 6 Diagram tegangan-regangan statis beton

Sumber: Wang et al.(2012)

2.2 Karakteristik Beton Serat Kinerja Tinggi

Karakteristik beton serat kinerja tinggi dapat dilihat dari sifat fisik, sifat mekanik, rheologi dan durabilitasnya. Sifat rheologi ditentukan melalui pengujian diameter slam dan waktu aliran slam. Pengujian waktu aliran menggunakan alat *V-funnel* and *L-box*. Karakteristik mekanik ditentukan dari pengujian kuat tekan, kuat tarik belah benda uji silinder dan pengujian lentur spesimen balok atau pelat. Sifat durabilitas dapat diketahui melalui evaluasi hasil uji absorpsi air, uji absorpsi kapiler, uji prosentase ion CL, dan uji resistivitas (Jalal, Mansouri, Sharifipour, & Pouladkhan, 2012).

Dalam pengukuran tegangan leleh, hasil uji slam beton segar dalam kondisi tertentu dapat dikorelasikan dengan tegangan beton yang diuji. Selama uji slam, aliran beton segar berhenti ketika tegangan geser sampel yang diuji sama dengan atau lebih kecil dari tegangan leleh. Akibatnya bentuk di akhir penghentian aliran secara langsung terkait dengan tegangan luluh bahan. Dari sudut pandang praktis, dua kuantitas geometri dapat diukur, "*slump*" atau "*spread*". *Slump* adalah perbedaan antara tinggi cetakan pada awal tes dan setelah penghentian aliran. *Spread* adalah diameter akhir dari sampel runtuh. Dalam sebagian besar

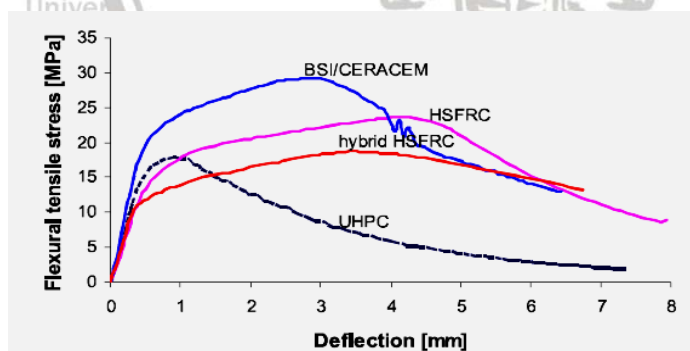
aplikasi dari kerucut ASTM Abrams, dengan ketinggian awal 30 cm, slam diukur jika lebih kecil dari 25 cm, sedangkan *spread* diukur apa adanya (Kovler & Roussel, 2011).

Penelitian terkait karakteristik beton serat kinerja tinggi, diantaranya adalah penelitian pengaruh komposisi bahan beton kinerja tinggi terhadap perilaku kuat tekan mortar beton yang menggunakan bahan pasir lumajang (Krisnamurti, Aswatama, & Widiarti, 2014).

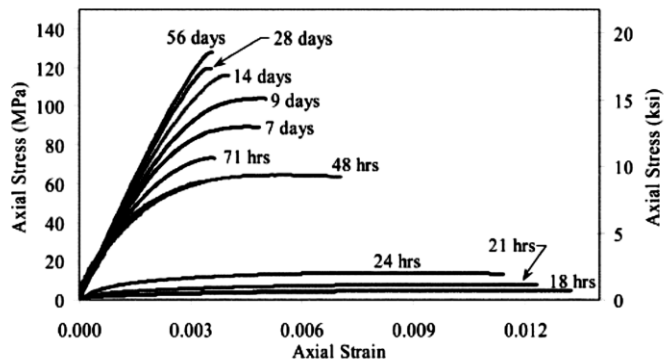
Penelitian perilaku tarik dan lentur HPFRC untuk mengembangkan model konstitutive dari retakan HPFRC sesuai arah serat (Shionaga, Walraven, Uijl, & Sato, 2006) dan penelitian respon beton UHPFRC terhadap pembebanan *impact* dan beban statik (Habel & Gauvreau, 2008).

2.2.1 Perilaku tegangan regangan beton serat kinerja tinggi

Perilaku elemen struktur beton serat kinerja tinggi adalah nonlinear, karena: 1) perilaku nonlinear bahan beton dan baja, dan interaksinya melalui ikatan dan aksi dowel; 2) retak beton; dan 3) efek tergantung waktu seperti rangkai, susut, suhu dan riwayat pembebanan (Kwak & Filippou, 1990). Hasil uji statik pada Gambar 2.7. memperlihatkan bahwa ketiga campuran beton serat (BSI/CERACEM, HSFRC, Hybrid HSFRC) memiliki defleksi fase pengerasan, sebuah karakteristik penting untuk perilaku beton saat menahan beban statik. Pada campuran UHPC (*Ultra High Performance Concrete*) tanpa serat, karakteristik tersebut tidak muncul dan terjadi perilaku yang kurang daktail (Lappa, Veen, & Walraven, 2006).

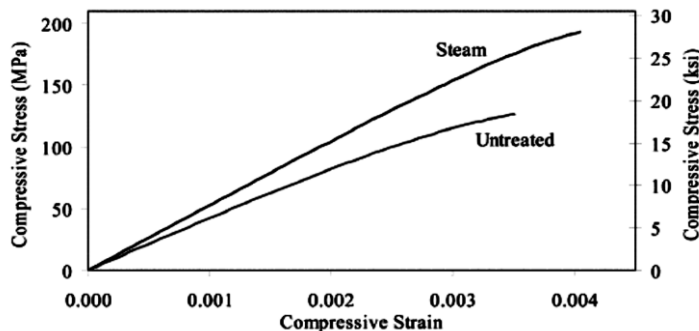


Gambar 2. 7 Hasil uji statik *four point bending* balok 125/125/1000 mm
Sumber: Lappa et al. (2006)



Gambar 2. 8 Respons tegangan-regangan terpilih untuk beton kinerja tinggi tanpa perlakuan khusus
Sumber: Graybeal (2007)

Gambar 2.8 memperlihatkan bahwa dengan meningkatnya kuat tekan, terjadi penurunan pada perilaku non-linieritas pra-puncak dan kapasitas regangan pasca-puncak. Gambar 2.9 menunjukkan bahwa regangan pada puncak kuat tekan diprediksi sebesar 0,0041 untuk perawatan dengan penguapan dan 0,0037 untuk tanpa penguapan (B. A. Graybeal, 2007).



Gambar 2. 9 Perkiraan respons tegangan-regangan tekan beton kinerja tinggi dengan penguapan dan tanpa penguapan.
Sumber: Graybeal (2007)

2.2.2 Modulus elastisitas beton serat kinerja tinggi

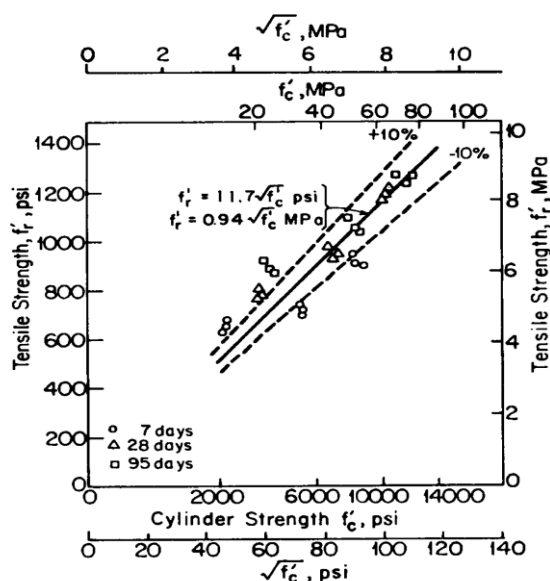
Sifat-sifat beton, seperti hubungan tegangan-regangan, modulus elastisitas, tegangan tarik, tegangan geser, dan tegangan lekat biasanya dinyatakan dalam terminologi kuat tekan uniaksial silinder $\phi 150 \times 300$ mm. Umumnya di Indonesia, pernyataan didasarkan pada data pengujian kuat tekan beton kurang dari 41 MPa. Pada tahun 1934, Thoman dan Raede melaporkan nilai modulus elastisitas, sebagai kemiringan diagram tegangan-regangan tekan uniaksial pada 25% tegangan maksimum, adalah sebesar 29 GPa hingga 36 GPa untuk beton dengan kuat tekan antara 69 MPa hingga 76 MPa. Hubungan antara modulus elastisitas E_c dan kuat tekan f'_c beton dengan berat normal (*normal weight concrete*) adalah (ACI 363R-92, 1997):

$$E_c = 3320 \sqrt{f'_c} + 6900 \text{ MPa} \quad (2-3)$$

untuk kuat tekan $21 \text{ MPa} < f'_c < 83 \text{ MPa}$.

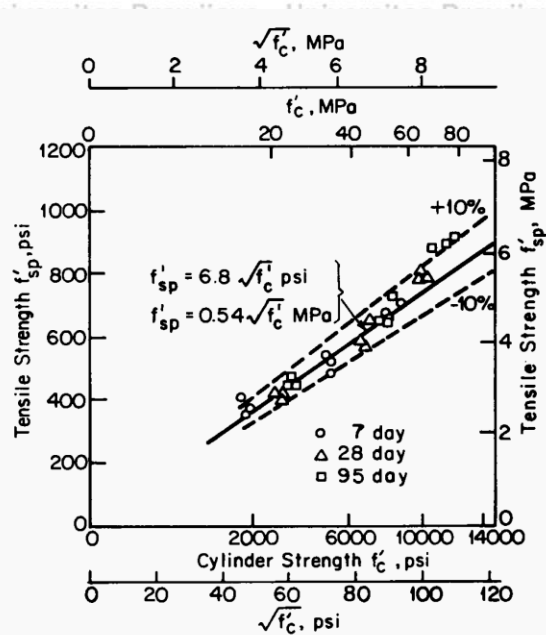
Rasio Poisson beton mutu tinggi dalam rentang elastik dapat dibandingkan dengan dugaan rentang nilai beton mutu yang lebih rendah (ACI 363R-92, 1997). Rasio poisson diasumsikan 0,2. Modulus elastisitas baja tulangan ulir dapat diambil sebesar 200.000 MPa (ACI 343R-95, 1995). Dalam praktek, ketika persentase volume serat kurang dari 2 persen, modulus elastisitas dan rasio poisson beton dengan perkuatan serat baja umumnya diambil sama dengan mortar atau beton non-serat yang sama (ACI 544.1R-96, 1997). Kuat tarik beton akibat lentur (*modulus of rupture*) besarnya sekitar 10% - 15% dari kuat tekannya. Namun kuat tarik beton akibat lentur biasanya diabaikan dalam perencanaan kekuatan (Carino & Clifton, 1995).

Dalam ACI 363R-92 disebutkan bahwa prediksi kuat tarik beton dengan berat normal, yang diukur dengan modulus keruntuhan (*modulus of rupture*) f'_r dari kuat tekan adalah $f'_r = 0,94 \sqrt{f'_c} \text{ MPa}$ untuk kuat tekan beton $21 \text{ MPa} < f'_c < 83 \text{ MPa}$ sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.10. Prediksi kuat tarik belah (*the tensile splitting strength*) beton f_{ct} adalah $f_{ct} = 0,59 \sqrt{f'_c} \text{ MPa}$ untuk kuat tekan beton $21 \text{ MPa} < f'_c < 83 \text{ MPa}$ sebagaimana terlihat pada Gambar 2.11. (ACI 363R-92, 1997). Dari berbagai batasan tersebut terlihat bahwa peraturan yang ada belum memunculkan prediksi untuk beton dengan mutu di atas 83 MPa, sehingga masih dibutuhkan banyak penelitian lebih lanjut.



Gambar 2.10 Kuat tarik berdasarkan uji *modulus of rupture*.

Sumber: Carrasquillo, Nilson, & Slate (1981)



Gambar 2. 11 Kuat tarik berdasarkan uji tarik belah silinder

Sumber: Carrasquillo et al. (1981)

2.3 Rancangan Campuran Beton Serat Kinerja Tinggi

Peraturan yang mengatur beton kinerja tinggi, di antaranya adalah *State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete* (ACI 363R-92, 1997) dan *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete* (ACI 544.1R-96, 1997). Agregat halus dengan bentuk partikel bulat dan tekstur halus membutuhkan lebih sedikit air. Gradasi optimum agregat halus beton berkekuatan tinggi lebih ditentukan oleh efek kebutuhan air. Pasir dengan modulus kehalusan dibawah 2,5 menyebabkan beton sulit menjadi padat. Pasir dengan modulus kehalusan 3,0 menghasilkan *workability* dan kekuatan tekan yang terbaik. Untuk kuat tekan optimum diperlukan ukuran maksimum agregat kasar 12,7 mm atau 9,5 mm. Peningkatan kekuatan disebabkan reduksi tegangan lekat rata-rata karena meningkatnya luas permukaan masing-masing agregat secara individual. Ikatan partikel agregat 76 mm hanya sekitar 1/10 dari partikel berukuran 13 mm. Batu pecah menghasilkan kekuatan yang lebih tinggi dibanding kerikil bulat, disebabkan ikatan mekanis yang terjadi lebih besar. Agregat harus bersih, berbentuk kubus, angular, berupa batu pecah dengan partikel yang gepeng dan melengkung minimum (ACI 363R-92, 1997). Rentang proporsi beton serat baja normal dapat dilihat pada Tabel 2.8.

Tabel 2. 8 Rentang Proporsi Beton Serat Baja Normal

Parameter campuran	Ukuran agregat maksimum		
	3/8 in (9,5 mm)	¾ in (19 mm)	1 ½ in (38 mm)
Semen, lb/yd ³	600 – 1000	500 – 900	470 – 700
w/c Ratio	0,35 – 0,45	0,35 – 0,50	0,35 – 0,55
% of fine to coarse aggregate	45 – 60	45 – 55	40 – 55
Entrained air content, %	4 – 8	4 – 6	4 – 5
Kadar serat, % volume			
Deformed fiber	0,4 – 1,0	0,3 – 0,8	0,2 – 0,7
Smooth fiber	0,8 – 2,0	0,6 – 1,6	0,4 – 1,4

Sumber: ACI 544.1R-96 (1997)

Dalam *Guide to Quality Control and Assurance of High-Strength Concrete* (ACI 363.2R-11, 2011) disebutkan bahwa kontrol kualitas dan pengujian beton berkekuatan tinggi (*high strength concrete*) lebih kritis dibanding beton dengan kekuatan normal (*normal-strength concrete*), karena deviasi minor dari persyaratan khusus akan menghasilkan defisiensi besar pada kualitas atau hasil pengujian. Kualitas beton berkekuatan tinggi dikontrol melalui kualitas dan keseragaman kandungannya, proses pencampuran, penempatan dan kondisi perawatannya. Kontrol kualitas pada level yang tertinggi sangat penting selama produksi, pengujian, transportasi, penempatan, dan perawatan beton. Diperlukan adanya pertimbangan yang cermat untuk menentukan batasan-batasan penghamparan, workabilitas, kesulitan selama proses pengangkutan, persyaratan perawatan di lapangan, serta proses inspeksi dan pengujian.

2.3.1 Komposisi rancangan campuran beton serat kinerja tinggi

Dalam menyusun rancangan campuran beton berkinerja tinggi, digunakan acuan ACI 211.1 yang telah diadopsi dan dimodifikasi menjadi SNI 7656:2012. Spesifikasi/persyaratan beton yang akan diproduksi dapat didasarkan sebagian atau seluruhnya dari ketentuan: 1) Rasio air-semen maksimum atau rasio air-bahan bersifat semen; 2) Kadar semen minimum; 3) Kadar udara; 4) Slam; 5) Ukuran besar butir agregat maksimum; 6) Kuat tekan yang ditargetkan; 7) Persyaratan lain yang berkaitan dengan kekuatan yang berlebihan, bahan tambah, semen tipe khusus, bahan bersifat semen lain, atau agregat.

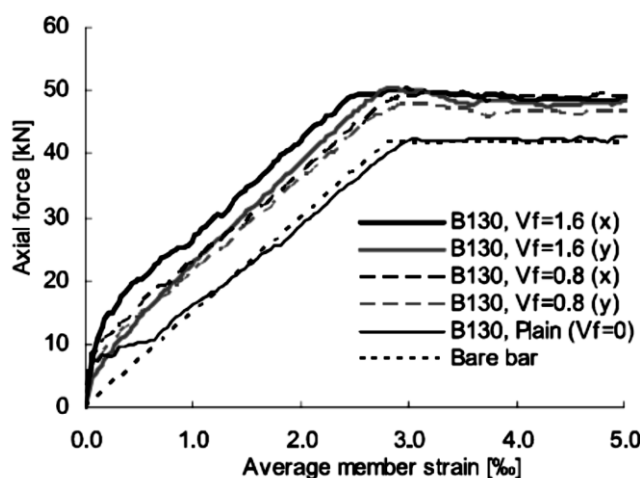
2.3.2 Pencampuran bahan beton serat kinerja tinggi

Jumlah spesimen dan jumlah adukan pengujian tergantung pada kebutuhan program uji. Biasanya tiga atau lebih spesimen dibentuk untuk setiap umur pengujian dan kondisi uji, kecuali ada ketentuan lain. Spesimen yang melibatkan variabel yang diberikan harus dibuat dari tiga campuran terpisah pada hari yang berbeda. Jumlah yang sama dari spesimen untuk

setiap variabel harus dibuat pada hari yang ditentukan, pencampuran dari seluruh seri spesimen harus diselesaikan dalam beberapa hari jika memungkinkan, dan satu campuran harus diulang setiap hari sebagai standar perbandingan (ASTM C 192/C 192M-02, 2002).

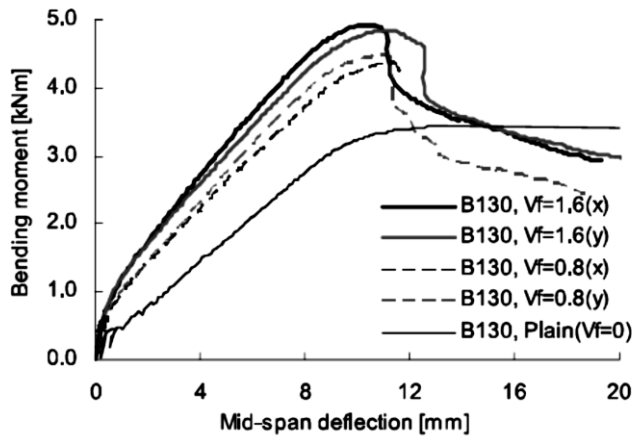
2.3.3 Penataan serat pada pelat beton serat kinerja tinggi

Rangkaian pengujian pengaruh serat baja terhadap respons pengaku tegangan dan respons tarik elemen ditunjukkan pada Gambar 2.12 dan terhadap respons defleksi pelat tipis ditunjukkan pada Gambar 2.13. Pengujian dilakukan dengan serat baja lurus dengan panjang 13 mm dan diameter 0,16 mm dan orientasi serat divariasikan dengan mengatur arah pencetakan. Nilai respons tersebut dipengaruhi oleh kandungan serat dan arah pencetakan (x = sejajar arah gaya, y = tegak lurus arah gaya). Penambahan serat baja meningkatkan tensi pengaku regangan serta beban aksial saat tulangan mulai leleh. Hal ini terlihat pada bentuk retakan lebih halus, jarak retakan lebih kecil, dan berkurangnya lebar retak rata-rata. Arah orientasi serat, sesuai variasi arah aliran saat pencetakan, mempengaruhi respon tarik dan lentur dari pelat HPFRC. Arah serat sejajar gaya yang bekerja menyebabkan penurunan defleksi elemen (Shionaga et al., 2006).



Gambar 2. 12 Regangan spesimen tarik aksial pada rangkaian uji tarik HPFRC.

Sumber: Shionaga et al. (2006)



Gambar 2. 13 Defleksi bentang tengah spesimen lentur *four-point bending*

Sumber: Shionaga et al, (2006)

Untuk memprediksi perilaku tarik pasca-retak beton serat kinerja tinggi, diperlukan evaluasi faktor orientasi serat yang menunjukkan jumlah serat yang berperan pada retakan.

Dari model, persamaan tegangan tarik beton serat baja adalah:

$$f_f = \alpha_f V_f \sigma_{f.avg} \quad (2-4)$$

dengan, f_f adalah tegangan tarik yang dicapai oleh serat baja, α_f adalah faktor orientasi serat, V_f adalah rasio volume serat, dan $\sigma_{f.avg}$ adalah tegangan tarik rata-rata serat pada retakan. Dari persamaan (2.4) terlihat bahwa tegangan tarik dari beton bertulang serat baja secara langsung dipengaruhi oleh faktor orientasi serat. Dari jumlah serat (N_f), faktor orientasi serat dapat dievaluasi dari luas penampang serat (A_f), rasio serat volumetrik (V_f), dan luas penampang dari anggota beton (A_c), dengan persamaan berikut:

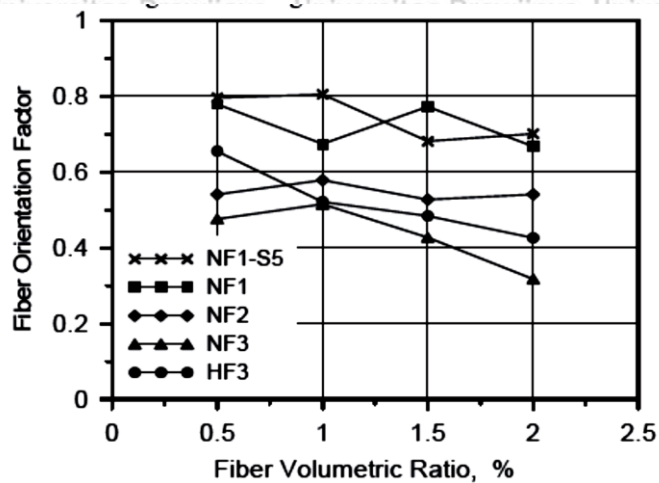
$$\alpha_f = (N_f A_f) / (V_f A_c) \quad (2-5)$$

Faktor orientasi serat yang diamati melalui jumlah serat pada celah retakan disajikan pada Gambar 2.14. Perlu dicatat bahwa setiap titik dalam grafik mewakili faktor orientasi serat rata-rata melalui empat spesimen. Melalui prosedur regresi, faktor orientasi serat sederhana telah diturunkan sebagai berikut (Lee, Oh, & Cho, 2015):

$$\alpha_f = -0,1 \left(\left(\frac{h}{l_f} \right)^{2,8} + \left(\frac{b}{l_f} \right)^{2,8} \right) + 1 \quad \text{untuk } \left(\frac{h}{l_f} \right) \leq 1,0 \text{ dan } \left(\frac{b}{l_f} \right) \leq 1,0 \quad (2-6)$$

$$\alpha_f = - \frac{(0,05 (b/l_f)^{2,8} ((h/l_f)^{1,12} + 1) - 0,26)}{(h/l_f)^{1,12}} + 0,64 \quad \text{untuk } \left(\frac{h}{l_f} \right) \leq 1,0 \text{ dan } \left(\frac{b}{l_f} \right) > 1,0 \quad (2-7)$$

$$\alpha_f = \frac{0,13}{(bh/l_f^2)^{1,12}} + 0,087 \left(\left(\frac{l_f}{b} \right)^{1,12} + \left(\frac{l_f}{h} \right)^{1,12} \right) + 0,5 \quad \text{untuk } \left(\frac{h}{l_f} \right) > 1,0 \text{ dan } \left(\frac{b}{l_f} \right) > 1,0 \quad (2-8)$$



Gambar 2. 14 Hasil uji faktor orientasi serat
Sumber: Lee et al. (2015)

2.3.4 Pembuatan dan perawatan benda uji beton serat kinerja tinggi

ASTM C 192/C 192M-02 menyebutkan bahwa dimensi silinder untuk pengujian kuat tekan, modulus elastisitas, rangkai, dan kuat tarik belah bisa bervariasi dengan minimum diameter 50 mm dan panjang 100 mm. ASTM C 31/C 31M-03a menentukan spesimen standar adalah silinder dengan diameter 152 mm dan tinggi 305 mm. Ukuran spesimen ini dapat menyebabkan masalah praktis ketika dilakukan pengujian beton kekuatan tinggi karena beban hancur dapat melebihi kapasitas mesin uji yang tersedia. Oleh karena itu penggunaan silinder uji yang lebih kecil dapat diterima, dimana kekuatan yang tersedia ditentukan sesuai dengan ASTM C39/C39M-03. Ukuran untuk mengevaluasi percobaan proporsi campuran harus konsisten dengan ukuran untuk uji penerimaan, dan harus diterima oleh *Arsitek/Engineer*. Jika perlu, hubungan antara kuat tekan dua ukuran spesimen ditentukan pada tahap uji coba laboratorium atau lapangan dengan menggunakan mesin uji yang akan digunakan untuk proyek (ACI 363.2R-98, 1998).

Untuk pembuatan benda uji beton serat kinerja tinggi, dari setiap sampel campuran, total tiga spesimen silindris dengan diameter 100 mm dan tinggi 200 mm dicetak dan dirawat untuk pengujian kuat tekan beton kinerja tinggi. Hal ini sesuai hasil riset Graybeal & Davis (2008) pada Tabel 2.9, dan hasil riset Habel et al. (2006). Cetakan semua spesimen dibuka sesudah 24 jam dan spesimen diletakkan pada perawatan basah selama 28 hari. Sebelum penebaran, slam beton ditentukan dengan batasan 50 ± 10 mm (Ayub et al., 2014).

Tabel 2. 9 Konversi Hasil Uji Kuat Tekan

Diinginkan Hasil	Silinder diameter 76 mm	Silinder diameter 102 mm
Kubus 100 mm	Dikalikan 1,00 ($R^2=0,9672$)	Dikalikan 1,00 ($R^2=0,9791$)
Kubus 70,7 mm	Dikalikan 0,94 ($R^2=0,9857$)	Dikalikan 0,93 ($R^2=0,9694$)
Kubus 51 mm	Dikalikan 0,96 ($R^2=0,9541$)	Dikalikan 0,96 ($R^2=0,9472$)
Silinder ϕ 102 mm	Dikalikan 1,01 ($R^2=0,9853$)	----
Silinder ϕ 76 mm	----	Dikalikan 0,99 ($R^2=0,9839$)
Silinder ϕ 51 mm	Dikalikan 1,08 ($R^2=0,9645$)	Dikalikan 1,07 ($R^2=0,9360$)

Sumber: Graybeal & Davis (2008)

2.3.5 Pengujian kinerja elemen struktur beton serat kinerja tinggi

Elemen beton serat kinerja tinggi didesain untuk menahan tiga tipe pembebanan, yaitu: gaya aksial, momen lentur, dan gaya geser. Momen lentur terjadi jika elemen struktur ditahan pada titik tertentu dan dikenai beban tegak lurus terhadap sumbu memanjang elemen struktur tersebut. Elemen struktur, seperti balok dan pelat, yang dikenai momen lentur akan menimbulkan retak lentur ketika tegangan di daerah tarik melebihi kekuatan lentur beton serat kinerja tinggi (Carino & Clifton, 1995).

Metode untuk menentukan kuat tarik beton polos dapat diklasifikasikan ke dalam salah satu kategori berikut: 1) tegangan tarik langsung; 2) tegangan tarik lentur; dan 3) tegangan tarik tidak langsung. Karena sulitnya menerapkan gaya tarik murni pada spesimen beton polos, tidak ada pengujian standar untuk tegangan tarik langsung. Menurut ASTM C 78-02, pengukuran kuat tarik lentur beton, dapat diperoleh dari pengujian lentur balok beton polos. Ukuran kuat tarik tidak langsung diperoleh dari pengujian tarik belah sebagaimana dijelaskan dalam ASTM C496/C496M-04 dan SNI 03-2491-2002. Kuat tarik beton dari hasil pengujian lentur berkisar 40 hingga 80 persen lebih tinggi dibandingkan dari pengujian tarik belah (ACI 224.2R-92, 1997).

Perilaku tarik lentur beton serat kinerja tinggi dapat diketahui dengan menguji tiga buah balok dengan ukuran penampang 150 mm x 150 mm dan panjang 600 mm dengan tumpuan sederhana yang diberi pembebanan pada kondisi *three point loading*. (Soltanzadeh, Barros, & Santos, 2015)

2.4 Perilaku Lentur Pelat Beton Serat Kinerja Tinggi

Lentur pada pelat adalah defleksi tegak lurus terhadap bidang pelat akibat gaya eksternal. Teori pelat lentur pada defleksi kecil klasik mengasumsikan bahwa bahan adalah elastis linier, homogen dan isotropik dan regangan yang berkembang pada bidang tengah dapat diabaikan untuk pembebanan transversal, sehingga gaya bersih yang berkembang pada

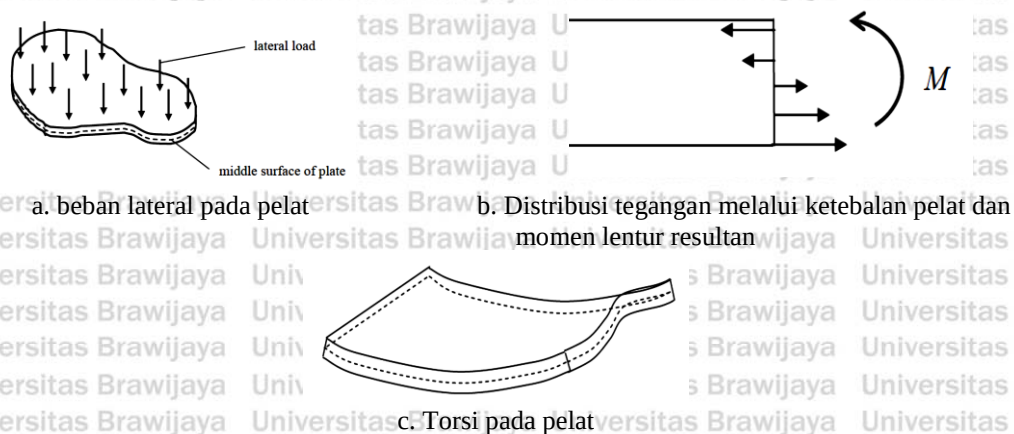
bidang pelat adalah nol. Tiga asumsi sebagai dasar dari Teori Pelat Klasik atau Teori Pelat Kirchhoff adalah: 1) Bidang tengah pelat tetap bebas dari tegangan/regangan searah bidang; 2) Elemen garis yang terletak tegak lurus terhadap permukaan tengah pelat tetap tegak lurus terhadap permukaan tengah selama deformasi; 3) Elemen garis yang terletak tegak lurus pada permukaan tengah tidak berubah panjangnya selama deformasi (Kelly, 2013).

Dua pendekatan berbeda telah digunakan untuk analisis pelat beton bertulang dengan metode elemen hingga: pendekatan kekakuan yang dimodifikasi dan pendekatan lapisan. Yang pertama didasarkan pada hubungan *moment-curvature* rata-rata yang mencerminkan berbagai tahap perilaku bahan, sedangkan yang kedua membagi elemen hingga menjadi lapisan-lapisan beton imajiner dan baja dengan hubungan tegangan-regangan ideal untuk beton dan baja tulangan (Kwak & Filippou, 1990). Dotreppe, Schnobrich, & Pecknold (1973) menggunakan prosedur elemen hingga berlapis dimana elemen pelat dibagi menjadi lapisan-lapisan untuk menghitung retak yang terjadi sepanjang tebal pelat. Scanlon & Murray (1971) mengembangkan metode yang menggabungkan retak dan pengaruh waktu dari rangkai dan susut pelat. Mereka menggunakan elemen pelat persegi berlapis yang dapat mengalami retak lapis per lapis, dan diasumsikan bahwa perkembangan retak hanya sejajar dan tegak lurus terhadap penulangan memanjang. Lin & Scordelis (1975) menggunakan elemen hingga segitiga berlapis dalam analisis cangkang beton bertulang dan memasukkan pasangan antara membran dan pengaruh lentur, sebagaimana pengaruh kekakuan tarik beton di antara retakan dalam model.

2.4.1 Pembebanan lateral pada pelat beton serat kinerja tinggi

Dalam analisis pelat beton serat kinerja tinggi yang dikenai beban monotonik, beberapa macam teori dapat digunakan. Pelat dengan pembebanan searah bidang dapat diselesaikan menggunakan teori *plane stress* dua dimensi, yaitu apabila analisis dilakukan pada satu buah pelat utuh sehingga tegangan keluar bidang dapat diabaikan. Sedangkan, pelat dengan pembebanan lateral dapat diselesaikan dengan teori lentur pelat.

Komponen tegangan pada teori pelat diijinkan untuk bervariasi sepanjang ketebalan pelat, sehingga momen lentur dapat terjadi. Teori pelat merupakan teori aproksimasi; asumsi dibuat dari persamaan elastisitas tiga dimensi yang direduksi. Hampir mirip dengan teori balok, namun dimensi pelat relatif tipis (sebagaimana dalam teori balok) tetapi defleksinya juga relatif kecil dibanding ketebalannya. Teori pelat sebenarnya lebih rumit, karena pelat tidak hanya melengkung, tetapi juga bisa terjadi torsi (atau memuntir) sebagaimana terlihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2. 15. Beban dan tegangan pada pelat
Sumber: Kwak & Filippou (1990)

2.4.2 Analisis elemen hingga pelat beton serat kinerja tinggi

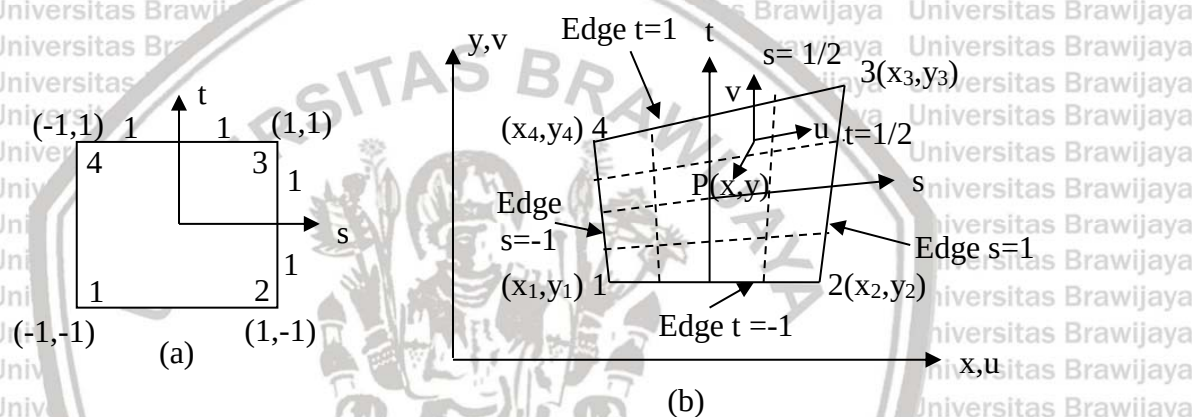
Bahan beton serat kinerja tinggi dimodelkan sebagai elemen isoparametrik segiempat dua dimensi. Pelat beton serat kinerja tinggi mula-mula dianggap dalam keadaan tidak retak dan diperlakukan sebagai jaringan pelat berlapis. Tegangan utama dihitung untuk setiap elemen diskrit pada lapisan jaringan pada pelat (Kwak & Filippou, 1990). Sebelum retak, konstanta elastik diambil dari nilai beton dan bahan dianggap isotropik. Tegangan tarik utama dibandingkan dengan batasan tegangan tarik tertentu dan jika dilewati, maka hubungan konstitutif untuk setiap lapis jaringan dimodifikasi untuk menggambarkan reduksi kekakuan karena retakan (Scanlon & Murray, 1971). Ketika beton retak, perilaku beton didekati dengan teori anisotropik. Retak pada pelat mereduksi tinggi efektif penampang melintang dan menurunkan momen inersia (I) (Tudjono, Pamungkas, & Lie, 2014). Setelah retak seluruh kekakuan direduksi karena beton tidak mampu menyalurkan tegangan tarik sepanjang retakan. Dalam hal ini konstanta elastik harus direduksi. Analisis diulang hingga tidak ada lagi retakan yang terdeteksi atau keruntuhan lentur telah terjadi.

1. *Formulasi isoparametrik dari matriks kekakuan elemen bidang*

Persamaan elemen isoparametrik dirumuskan menggunakan sistem koordinat natural (intrinsik) s - t yang didefinisikan menggunakan geometri elemen dan bukan oleh orientasi elemen dalam sistem koordinat global x - y . Terdapat pemetaan transformasi antara dua sistem koordinat untuk setiap elemen struktur, dan hubungan ini digunakan dalam merumuskan persamaan elemen.

Formulasi isoparametrik dari elemen segiempat (*quadrilateral*) mengacu pada matriks kekakuan elemen persegi panjang. Langkah pertama untuk mendapatkan matriks kekakuan elemen adalah membagi penampang menjadi sistem elemen hingga ekuivalen dengan node-node terkait (diskritisasi) dan memilih tipe elemen untuk memodelkan perilaku fisik aktual. Total jumlah elemen, variasi ukuran dan tipe yang sesuai dengan penampang aktual merupakan masalah teknis yang utama.

Mula-mula, koordinat natural elemen s - t ditentukan seperti pada Gambar 2.16. Sumbu s dan t tidak perlu *orthogonal*, dan tidak harus sejajar dengan sumbu x atau y . Orientasi koordinat s - t adalah titik pada keempat sudut yang tepinya dibatasi nilai 1 atau -1. Segiempat tersebut memiliki delapan derajat kebebasan $u_1, v_1, \dots$ hingga u_4, v_4 yang terkait dengan arah sumbu global x dan y .



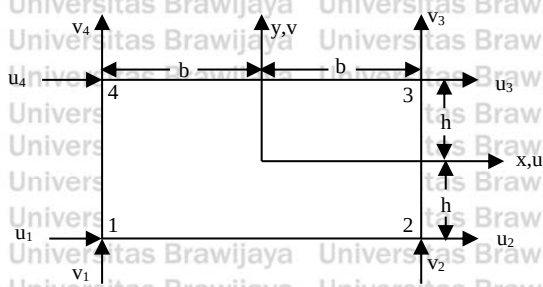
Gambar 2. 16 (a) Elemen persegi linier di koordinat s - t dan (b) Unsur persegi dipetakan ke segiempat dalam koordinat x - y dengan ukuran dan bentuk ditentukan oleh delapan koordinat nodal $x_1; y_1; \dots; y_4$

Sumber: Logan (2007:453)

Jika elemen pada Gambar 2.16 terdistorsi menjadi elemen persegi panjang dengan sisi sejajar koordinat global x - y pada Gambar 2.17, koordinat s - t dapat dihubungkan dengan koordinat elemen global x dan y oleh persamaan:

$$x = x_c + bs \quad y = y_c + ht \quad (2-9)$$

dengan x_c dan y_c adalah koordinat global dari pusat massa elemen.



Gambar 2. 17 Elemen persegi panjang empat node dengan derajat kebebasan nodal

Sumber: Logan (2007:450)

Fungsi bentuk yang mendefinisikan perpindahan pada elemen diberikan oleh Persamaan (2-10)

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{(b-x)(h-y)}{4bh} & N_2 &= \frac{(b+x)(h-y)}{4bh} \\ N_3 &= \frac{(b+x)(h+y)}{4bh} & N_4 &= \frac{(b-x)(h+y)}{4bh} \end{aligned} \quad (2-10)$$

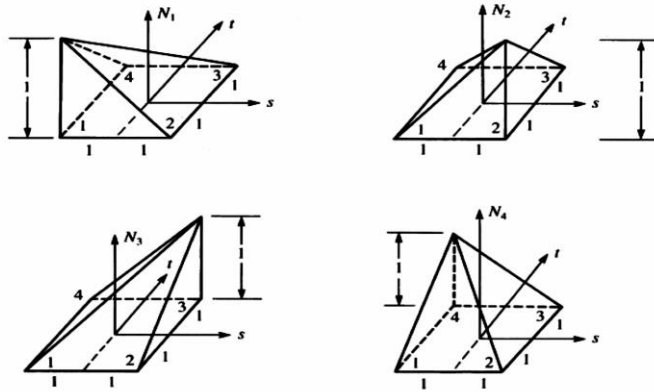
Fungsi-fungsi yang bentuknya sama ini digunakan untuk memetakan elemen persegi pada Gambar 2.18 (a) dalam koordinat isoparametrik s-t ke segiempat pada Gambar 2.16(b) dalam koordinat x-y dengan ukuran dan bentuknya ditentukan oleh delapan koordinat nodal $x_1, y_1, \dots, x_4$, dan y_4 . Pemetaan dalam bentuk matriks, bisa kita nyatakan:

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \\ x_3 \\ y_3 \\ x_4 \\ y_4 \end{Bmatrix} \quad (2-11)$$

Dengan fungsi bentuk dari persamaan (2-11) adalah:

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{(1-s)(1-t)}{4} & N_2 &= \frac{(1+s)(1-t)}{4} \\ N_3 &= \frac{(1+s)(1+t)}{4} & N_4 &= \frac{(1-s)(1+t)}{4} \end{aligned} \quad (2-12)$$

Fungsi bentuk dari persamaan (2-12) adalah linier. Variasi bentuk fisik N_i atas elemen dengan koordinat natural ditunjukkan pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Variasi dari fungsi bentuk pada elemen persegi linear
Sumber: Logan (2007:455)

Fungsi perpindahan dalam suatu elemen sekarang didefinisikan oleh fungsi bentuk yang sama, yaitu:

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ u_4 \\ v_4 \end{Bmatrix} \quad (2-13)$$

Di mana u dan v adalah perpindahan sejajar dengan koordinat global x dan y , dan fungsi bentuk diberikan oleh pers. (2-12). Perpindahan dari titik interior P yang terletak pada (x, y) dalam elemen pada Gambar 2.16(b) dijelaskan oleh u dan v dalam Pers. (2-13).

Selanjutnya adalah merumuskan matriks elemen $[B]$ untuk mengevaluasi $[k]$. Untuk membangun matriks kekakuan elemen, tentukan regangan sebagai turunan dari perpindahan dengan koordinat x dan y . Jika f adalah fungsi yang mewakili fungsi perpindahan u atau v . Namun, u dan v dinyatakan dengan koordinat s dan t . Maka perlu diterapkan aturan rantai diferensiasi sebagai berikut:

$$\frac{\partial f}{\partial s} = \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial s} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial s} \quad \frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t} \quad (2-14)$$

Persamaan (2-14) untuk $(\partial/\partial x)$ dan $(\partial/\partial y)$ dapat dipecahkan menggunakan aturan Cramer's, yang melibatkan evaluasi penentu, seperti

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} \\ \frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial y}{\partial t} \end{vmatrix} \frac{\partial f}{\partial y}}{\begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} \\ \frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial y}{\partial t} \end{vmatrix}} \quad \frac{\partial f}{\partial y} = \frac{\begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial f}{\partial s} \\ \frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial f}{\partial t} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} \\ \frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial y}{\partial t} \end{vmatrix}} \quad (2-15)$$

dengan penentu dalam penyebut adalah determinan dari matriks Jacobian J .

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} \\ \frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial y}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

Regangan elemen dinyatakan oleh persamaan:

$$[\varepsilon] = [B] [d] \quad (2-17)$$

Hubungan antara regangan dan perpindahan diberikan dalam bentuk matriks sebagai:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\cdot)}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial(\cdot)}{\partial y} \\ \frac{\partial(\cdot)}{\partial y} & \frac{\partial(\cdot)}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (2-18)$$

Di mana matriks persegi panjang di sisi kanan dari persamaan. (2-18) adalah sebuah matriks operator, itu adalah, $\frac{\partial(\cdot)}{\partial x}$ dan $\frac{\partial(\cdot)}{\partial y}$ mewakili turunan parsial dari variabel yang ditempatkan dalam tanda kurung.

Gunakan Pers. (2-15) dan evaluasi determinan dalam pembilang, kita memiliki

$$\frac{\partial(\cdot)}{\partial x} = \frac{1}{[J]} = \left[\frac{\partial y}{\partial t} \frac{\partial(\cdot)}{\partial s} - \frac{\partial y}{\partial s} \frac{\partial(\cdot)}{\partial t} \right] \quad (2-19)$$

$$\frac{\partial(\cdot)}{\partial y} = \frac{1}{[J]} = \left[\frac{\partial x}{\partial s} \frac{\partial(\cdot)}{\partial t} - \frac{\partial x}{\partial t} \frac{\partial(\cdot)}{\partial s} \right]$$

dengan $[J]$ adalah determinan dari J yang diberikan oleh persamaan (2-16). Gunakan persamaan (2-19) ke dalam persamaan (2-18) akan diperoleh regangan yang dinyatakan dalam koordinat natural (s - t) sebagai

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial y}{\partial t} \frac{\partial(\cdot)}{\partial s} - \frac{\partial y}{\partial s} \frac{\partial(\cdot)}{\partial t} & 0 \\ 0 & \frac{\partial x}{\partial s} \frac{\partial(\cdot)}{\partial t} - \frac{\partial x}{\partial t} \frac{\partial(\cdot)}{\partial s} \\ \frac{\partial x}{\partial s} \frac{\partial(\cdot)}{\partial t} - \frac{\partial x}{\partial t} \frac{\partial(\cdot)}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial t} \frac{\partial(\cdot)}{\partial s} - \frac{\partial y}{\partial s} \frac{\partial(\cdot)}{\partial t} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (2-20)$$

Gunakan persamaan. (2-13), kita dapat mengekspresikan persamaan (2-20) dalam hal fungsi bentuk dan koordinat global dalam bentuk matriks kompak

$$[\varepsilon] = [D]' [N] [d] \quad (2-21)$$

dengan $[D]'$ adalah operator matriks yang diberikan oleh:

$$[D]' = \frac{1}{[J]} = \begin{bmatrix} \frac{\partial y}{\partial t} \frac{\partial(\cdot)}{\partial s} - \frac{\partial y}{\partial s} \frac{\partial(\cdot)}{\partial t} & 0 \\ 0 & \frac{\partial x}{\partial s} \frac{\partial(\cdot)}{\partial t} - \frac{\partial x}{\partial t} \frac{\partial(\cdot)}{\partial s} \\ \frac{\partial x}{\partial s} \frac{\partial(\cdot)}{\partial t} - \frac{\partial x}{\partial t} \frac{\partial(\cdot)}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial t} \frac{\partial(\cdot)}{\partial s} - \frac{\partial y}{\partial s} \frac{\partial(\cdot)}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (2-22)$$

dan $[N]$ adalah matriks fungsi bentuk dan $[d]$ adalah matriks kolom pada sisi kanan persamaan (2-13).

Definisikan $[B]$ sebagai

$$\begin{matrix} [B] & = & [D]' & [N] \\ (3 \times 8) & & (3 \times 2) & (2 \times 8) \end{matrix} \quad (2-23)$$

Bentuk eksplisit B dapat diperoleh dengan mengganti Persamaan. (2-22) untuk $[D]'$ dan fungsi bentuk pers. (2-12) menjadi Persamaan (2-23). Perkalian matriks menjadi

$$B(s, t) = \frac{1}{|J|} \begin{bmatrix} B_1 & B_2 & B_3 & B_4 \end{bmatrix} \quad (2-24)$$

dengan sub matriks $[B]$ diberikan oleh

$$B_i = \begin{bmatrix} a(N_{i,s}) - b(N_{i,t}) & 0 \\ 0 & c(N_{i,t}) - d(N_{i,s}) \\ c(N_{i,t}) - d(N_{i,s}) & a(N_{i,s}) - b(N_{i,t}) \end{bmatrix} \quad (2-25)$$

Dalam hal ini i adalah variabel *dummy* 1,2,3, dan 4, dan

$$a = \frac{1}{4} [y_1(s-1) + y_2(-1-s) + y_3(1+s) + y_4(1-s)] \quad (2-26)$$

$$b = \frac{1}{4} [y_1(t-1) + y_2(1-t) + y_3(1+t) + y_4(-1-t)]$$

$$c = \frac{1}{4} [x_1(t-1) + x_2(1-t) + x_3(1+t) + x_4(-1-t)]$$

$$d = \frac{1}{4} [x_1(s-1) + x_2(-1-s) + x_3(1+s) + x_4(1-s)]$$

Determinan $|J|$ adalah polinomial dalam s dan t . Dengan menggunakan Persamaan. (2-16) untuk $|J|$ dan pers. (2-9) untuk x dan y , kita dapatkan:

$$|J| = \frac{1}{8} \{X_c\}^T \begin{bmatrix} 0 & 1-t & t-s & s-1 \\ t-1 & 0 & s+1 & -s-t \\ s-t & -s-1 & 0 & t+1 \\ 1-s & s+t & -t-1 & 0 \end{bmatrix} \{Y_c\} \quad (2-27)$$

$$\text{dengan } \{X_c\}^T = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4] \quad (2-28)$$

dan

$$\{Y_c\} = \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{Bmatrix} \quad (2-29)$$

Hubungan tegangan/regangan adalah $[\sigma] = [D] [B] [d]$.

Matriks kekakuan untuk ketebalan h konstan adalah:

$$[k] = \iint_A [B]^T [D] [B] h \, dx \, dy \quad (2-30)$$

Persamaan tersebut kemudian ditransformasikan oleh persamaan

$$\iint_A f(x, y) \, dx \, dy = \iint_A f(s, t) |J| \, ds \, dt \quad (2-31)$$

yang merupakan hasil dari teorema kalkulus integral, sehingga menjadi:

$$[k] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B]^T [D] [B] h [J] ds dt \quad (2-32)$$

Gaya yang bekerja pada semua volume elemen kontinu disebut *body force* dan mempunyai satuan “gaya per unit volume”. *Body force* dapat berupa berat sendiri bahan, gaya inersia, maupun gaya magnit. Matriks gaya akibat massa di seluruh bagian struktur (*body force*) ditentukan dengan persamaan:

$$\begin{Bmatrix} f_b \\ (8 \times 1) \end{Bmatrix} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \begin{Bmatrix} N \\ (8 \times 2) \end{Bmatrix}^T \begin{Bmatrix} X \\ (2 \times 1) \end{Bmatrix} h [J] ds dt \quad (2-33)$$

Matriks *body-force* dalam persamaan (2-33) harus dievaluasi menggunakan integrasi numerik.

Surface force atau *surface traction* didefinisikan sebagai gaya kontak (*contact force*) per satuan luas, pada waktu t , pada suatu bidang datar, yang melewati x , dengan unit normal n . Matriks *Surface-force*, katakanlah, sepanjang tepi $t=1$ (Gambar 2.19) dengan panjang keseluruhan L , adalah:

$$\begin{Bmatrix} f_s \\ (4 \times 1) \end{Bmatrix} = \int_{-1}^1 \begin{Bmatrix} N_s \\ (4 \times 2) \end{Bmatrix}^T \begin{Bmatrix} T \\ (2 \times 1) \end{Bmatrix} h \frac{L}{2} ds \quad (2-34)$$

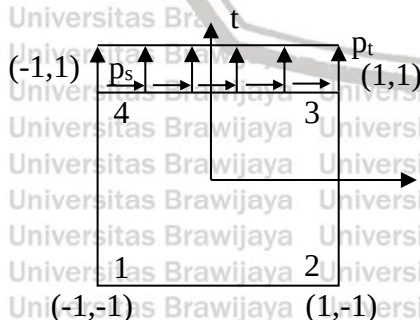
atau

$$\begin{Bmatrix} f_{s3s} \\ f_{s3t} \\ f_{s4s} \\ f_{s4t} \end{Bmatrix} = \int_{-1}^1 \begin{bmatrix} N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_3 & 0 & N_4 \end{bmatrix}^T \begin{Bmatrix} p_s \\ p_t \end{Bmatrix} h \frac{L}{2} ds \quad (2-35)$$

dievaluasi
sepanjang $t=1$

Karena $N_1 = 0$ dan $N_2 = 0$ sepanjang sisi $t=1$, dan karenanya, tidak ada gaya nodal yang terdapat pada node 1 dan 2. Untuk kasus *uniform* (konstan) p_s dan p_t sepanjang $t=1$, matriks *surface-force* total adalah:

$$\{f_s\} = h \frac{L}{2} [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ p_s \ p_t \ p_s \ p_t]^T \quad (2-36)$$



Gambar 2. 19 Traksi permukaan (*Surface traction*): p_s dan p_t bekerja pada sisi $t = 1$
Sumber: Logan (2007:460)

2. Analisis model dengan teori plane stress

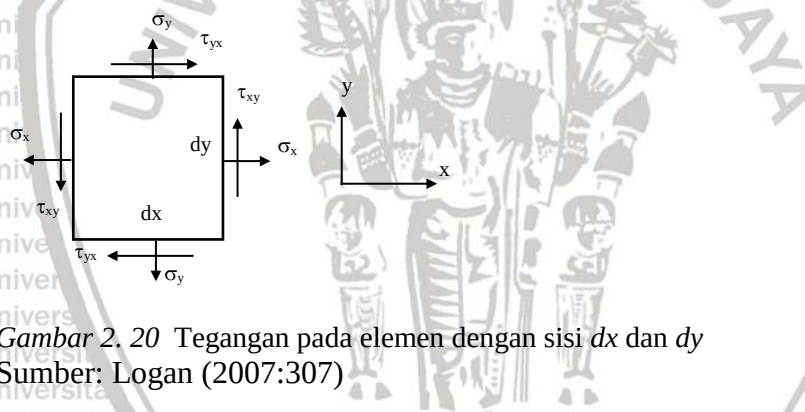
Dalam analisis struktur beton bertulang, masalah *plane stress* merupakan mayoritas terbesar dalam praktek. Pada saat permukaan mencapai leleh awal, beton diasumsikan sebagai bahan homogen dan isotropik linier. Hubungan tegangan regangan untuk masalah *plane stress* memiliki bentuk sederhana:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2-37)$$

dengan E adalah modulus elastisitas awal beton dan ν adalah *Poisson's ratio*.

Kita tinjau suatu elemen kecil dengan sisi dx dan dy , yang memiliki tegangan normal σ_x dan σ_y yang bekerja dalam arah x dan y (sisi vertikal dan horisontal) pada Gambar 2.20. Tegangan geser τ_{xy} bekerja pada sisi x (sisi vertikal) dalam arah y . Tegangan geser τ_{yx} bekerja pada sisi y (sisi horisontal) dalam arah x . Sehingga τ_{xy} sama dengan τ_{yx} . Akan didapat tiga tegangan independen:

$$\{\sigma\}^T = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \tau_{xy}] \quad (2-38)$$



Gambar 2. 20 Tegangan pada elemen dengan sisi dx dan dy
Sumber: Logan (2007:307)

Hubungan untuk tegangan utama dalam dua dimensi adalah:

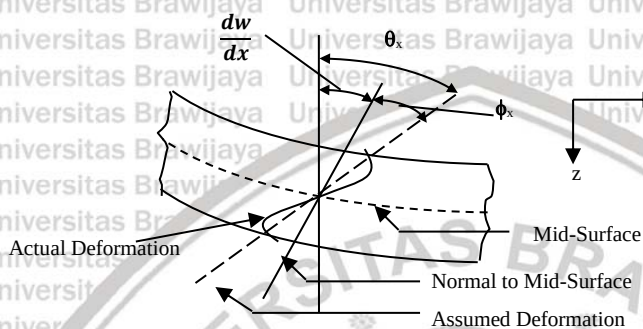
$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} = \sigma_{max} \quad (2-39)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} = \sigma_{min}$$

3. Analisis model dengan teori pelat mindlin

Untuk analisis pelat HPFRC, digunakan teori balok Timoshenko. Perhatian difokuskan pada beberapa aspek teoritis dari masalah pelat lentur dan diikuti dengan implementasi elemen hingga model bahan dalam analisis pelat beton bertulang. Dalam analisis pelat tipis, diasumsikan bahwa tebal pelat relatif kecil terhadap dimensinya pada bidang x - y , yang merupakan bidang pelat. Ketika pelat dikenai beban *in-plane*, tegangan yang dihasilkan

diasumsikan konstan sepanjang tebal pelat, dan tegangan σ_z , τ_{xz} , dan τ_{yz} diabaikan. Untuk pembebanan keluar bidang, diadopsi teori lentur pelat Mindlin sebagai akibat pengaruh deformasi geser transversal dengan asumsi: 1) Perpindahan transversal relatif kecil dibandingkan dengan ketebalan pelat; 2) Tegangan normal ke bidang-tengah pelat diabaikan; dan 3) Tegak lurus ke pertengahan permukaan pelat sebelum deformasi tetap lurus, tetapi tidak perlu normal ke pertengahan permukaan setelah deformasi, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.21. Resultan gaya dan perpindahan yang sesuai dari tipikal pelat Mindlin ditunjukkan pada Gambar 2.22.



Gambar 2. 21 Asumsi deformasi pada teori lentur pelat Mindlin
Sumber: Kwak & Filippou (1990)

Bidang masalah deformasi terdiri dari tiga komponen:

$$\{d\} = \{w \quad \vartheta_x \quad \vartheta_y\}^T \quad (2-40)$$

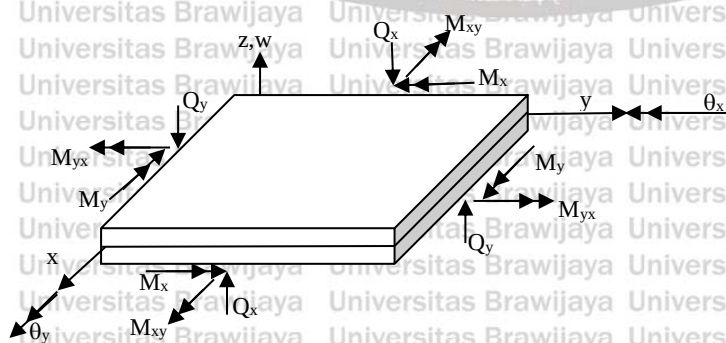
dengan w adalah perpindahan pelat transversal tegak lurus terhadap bidang x - y dan ϑ_x dan ϑ_y adalah rotasi terhadap sumbu y dan sumbu x (Gambar 2.22). Dengan asumsi teori pelat

Mindlin tersebut, dapat dinyatakan bahwa:

$$\vartheta_x = \frac{\delta w}{\delta x} - \varphi_x \quad (2-41)$$

$$\vartheta_y = \frac{\delta w}{\delta y} - \varphi_y \quad (2-42)$$

Di mana φ_x dan φ_y adalah rotasi geser transversal.



Gambar 2. 22 Tipikal Pelat Mindlin
Sumber: Kwak & Filippou (1990)

Dengan menggunakan asumsi dasar dari teori perpindahan, setiap titik dalam pelat dapat dinyatakan dengan:

$$u(x, y, z) = u_o(x, y) + [d_{nx}(x, y) - z] \cdot \vartheta_x \quad (2-43)$$

$$v(x, y, z) = v_o(x, y) + [d_{ny}(x, y) - z] \cdot \vartheta_y \quad (2-44)$$

$$w(x, y, z) = w_o(x, y) \quad (2-45)$$

dengan d_{nx} dan d_{ny} adalah jarak dari permukaan atas pelat ke titik dalam plat dengan deformasi *in-plane* u_o dan v_o . Harus dicatat bahwa d_{nx} dan d_{ny} tidak selalu persis sama.

Regangan lentur ε_x , ε_y , dan γ_{xy} bervariasi linier melalui ketebalan pelat dan dapat dijabarkan menggunakan persamaan 2-46 hingga persamaan 2-48:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_{ox} + (d_{nx} - z) \cdot \frac{\partial \vartheta_x}{\partial x} \quad (2-46)$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_{oy} + (d_{ny} - z) \cdot \frac{\partial \vartheta_y}{\partial y} \quad (2-47)$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{oxy} + (d_{nx} - z) \cdot \frac{\partial \vartheta_x}{\partial y} + (d_{ny} - z) \cdot \frac{\partial \vartheta_y}{\partial x} \quad (2-48)$$

atau

$$\{\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \gamma_{xy}\} = \{\varepsilon_p\}^T \quad (2-49)$$

Karena γ_{xy} bervariasi secara linier dengan jarak z , persamaan 2-48 dapat disederhanakan dengan relasi berikut:

$$\gamma_{xy} = \gamma_{oxy} + (d_{nxy} - z) \cdot \left(\frac{\partial \vartheta_x}{\partial y} + \frac{\partial \vartheta_y}{\partial x} \right) \quad (2-50)$$

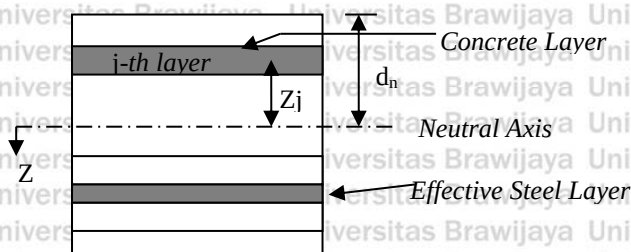
Regangan geser transversal, disisi lain, tetap konstan sepanjang ketebalan dan dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} - \vartheta_x \quad (2-51)$$

$$\gamma_{zy} = \frac{\partial w}{\partial y} - \vartheta_y \quad (2-52)$$

atau

$$\{\gamma_{zx} \quad \gamma_{zy}\} = \{\varepsilon_t\}^T \quad (2-53)$$



Gambar 2. 23. Pembagian lapisan pelat beton bertulang

Sumber: Kwak & Filippou (1990)

Akhirnya, d_{nx} , d_{ny} , dan d_{nxy} , yang menggambarkan perbandingan ketebalan dari ε_{ox} , ε_{oy} , dan γ_{oxy} . (Gambar 2.23) dapat ditentukan dari kondisi bahwa: $\int \sigma_x dz = \int \sigma_y dz = \int \tau_{xy} dz = 0$, yang merupakan pasangan *in-plane* dari gaya-gaya *out-of-plane*. Asumsikan bahwa modulus geser G konstan sepanjang tebal pelat mengarah pada penyelesaian bahwa d_{nxy} adalah sama dengan $d/2$, dengan d adalah ketebalan pelat.

Komponen regangan lentur dari persamaan 2-46 sampai 2-48 dapat dinyatakan sebagai berikut..

$$\{\varepsilon_p\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (d_{nx} - z) \cdot \frac{\partial \vartheta_x}{\partial x} \\ (d_{ny} - z) \cdot \frac{\partial \vartheta_y}{\partial y} \\ (d_{nxy} - z) \cdot \left(\frac{\partial \vartheta_x}{\partial y} + \frac{\partial \vartheta_y}{\partial x} \right) \end{Bmatrix} \quad (2-54)$$

Efek dari τ_{zx} dan τ_{zy} diabaikan pada derivasi ini. Ini adalah aproksimasi yang beralasan. Karena dengan hilangnya gaya-gaya *in-plane*, tegangan *in-plane* mencapai maksimum pada serat ekstrim, dengan tegangan geser transversal pada nilai terendah, dan mencapai minimum pada pertengahan-tebal pelat, dengan tegangan geser transversal tertinggi. Selanjutnya, dengan hilangnya gaya-gaya *in-plane* maka interaksi antara tegangan geser transversal dan tegangan *in-plane* adalah relatif kecil dan dapat diabaikan.

4. Representasi elemen hingga

Analisis elemen hingga kontinum dimulai dengan membagi sistem fisik menjadi rakitan elemen diskrit. Vektor perpindahan $\{d\}$ pada setiap titik pada bagian struktur diaproksimasi dengan fungsi interpolasi terkait koordinat umum d_i , yang merupakan *node* perpindahan dari diskritisasi elemen hingga struktur. Aproksimasi ini secara formal dapat ditulis sebagai:

$$\{d\} = [N]\{d\}^{ele} = [N_1 \quad \dots \quad N_i \quad \dots] \begin{Bmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_i \\ \vdots \end{Bmatrix} \quad (2-55)$$

Dengan komponen $[N]$ adalah fungsi dari posisi dan $\{d\}^{ele}$ adalah vektor perpindahan *node* bagian elemen. Sesudah perpindahan diketahui pada setiap titik elemen, regangan dapat ditentukan dari hubungan regangan-perpindahan. Hal ini dapat ditulis sebagai berikut:

$$\{\varepsilon\} = [B]\{d\}^{ele} \quad (2-56)$$

Tegangan dapat ditentukan dari hukum konstitutif bahan:

$$\{\sigma\} = [D] \cdot (\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}) + \{\sigma_0\} \quad (2-57)$$

dengan $[D]$ adalah matriks elemen bahan, $\{\varepsilon_0\}$ adalah vektor regangan awal dan $\{\sigma_0\}$ adalah vektor tegangan awal.

Dengan mengaplikasikan prinsip kerja virtual atau teorema energi potensial minimum untuk merakit elemen diskrit, persamaan kesetimbangan berikut menghasilkan:

$$[K] \cdot \{d\} + \{F\}_P + \{F\}_g + \{F\}_{\varepsilon_0} + \{F\}_{\sigma_0} - \{R\} = 0 \quad (2-58)$$

Dengan matriks kekakuan $[K]$:

$$[K] = \sum_{ele} \int [B]^T \cdot [D] \cdot [B] dV \quad (2-59)$$

Gaya-gaya *nodal* karena beban yang bekerja (*surface traction*):

$$\{F\}_P = - \sum_{ele} \int [N]^T \cdot \{p\} dV \quad (2-60)$$

Gaya-gaya *nodal* akibat berat sendiri (*body forces*):

$$\{F\}_g = - \sum_{ele} \int [N]^T \cdot \{g\} dV \quad (2-61)$$

Gaya-gaya *nodal* akibat regangan awal:

$$\{F\}_{\sigma_0} = - \sum_{ele} \int [B]^T \cdot [D] \cdot \{\sigma_0\} dV \quad (2-62)$$

Dalam persamaan (2-58) - (2-62) $\{d\}$ adalah vektor perpindahan *node*, $\{R\}$ adalah vektor gaya-gaya *nodal* yang bekerja, $\{p\}$ adalah vektor gaya-gaya luar yang bekerja (*surface forces*) dan $\{g\}$ adalah vektor berat sendiri (*body forces*).

5. Pelat beton bertulang

Elemen pelat Mindlin membutuhkan hanya kontinuitas C^0 dari fungsi perpindahan transversal w dan dua fungsi rotasi independen ϑ_x dan ϑ_y . Berdasarkan asumsi teori pelat Mindlin dan persyaratan kontinuitas metode elemen hingga, bidang perpindahan dalam persamaan 2-40 dapat dinyatakan dalam bentuk matriks:

$$\{d\} = \begin{Bmatrix} w \\ \vartheta_x \\ \vartheta_y \end{Bmatrix} = \sum_{j=1}^n \begin{bmatrix} N_j & 0 & 0 \\ 0 & N_j & 0 \\ 0 & 0 & N_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w \\ \vartheta_x \\ \vartheta_y \end{Bmatrix}_j \quad (2-63)$$

dengan n adalah jumlah *node* dari diskritisasi elemen hingga struktur dan N_j adalah fungsi bentuk *node* ke- j .

Gunakan persamaan 2-54 maka hubungan antara regangan *in-plane* dan perpindahan menjadi:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} (z - d_x) & 0 & 0 \\ 0 & (z - d_x) & 0 \\ 0 & 0 & (z - d_x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\partial N}{\partial x} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\partial N}{\partial y} \\ 0 & -\frac{\partial N}{\partial y} & -\frac{\partial N}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w \\ \vartheta_x \\ \vartheta_y \end{Bmatrix}^{ele} \quad (2-64)$$

atau dalam bentuk sederhana:

$$\{\varepsilon_p\} = [d_n] [B_p] [d]^{ele} \quad (2-65)$$

Dari persamaan 2-51 dan 2-52 hubungan antara regangan geser transversal dan perpindahan menjadi:

$$\begin{Bmatrix} \gamma_{zx} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} & -N & 0 \\ \frac{\partial N}{\partial x} & 0 & -N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w \\ \vartheta_x \\ \vartheta_y \end{Bmatrix}^{ele} \quad (2-66)$$

atau dalam bentuk sederhana

$$\{\varepsilon_t\} = [B_T] \cdot \{d\}^{ele} \quad (2-67)$$

Vektor regangan yang dihasilkan dari kombinasi persamaan 2-66 dan 2-67 adalah:

$$\{\varepsilon_p\} = \begin{Bmatrix} \{\varepsilon_p\} \\ \{\varepsilon_t\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [d_n] & [B_P] \\ [B_T] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w \\ \vartheta_x \\ \vartheta_y \end{Bmatrix}^{ele} \quad (2-68)$$

Dengan dekomposisi dari bidang regangan dalam persamaan 2-68 matriks kekakuan elemen pelat mindlin terdiri dari dua bagian:

$$[K] = [K_P] + [K_t] \quad (2-69)$$

Dengan:

$$[K_P] = \int_A [B_P]^T \cdot [D_P] \cdot [B_P] dA \quad (2-70)$$

dan

$$[K_t] = \int_A [B_t]^T \cdot [D_t] \cdot [B_t] dA \quad (2-71)$$

$[D_P]$ adalah lentur dan $[D_t]$ adalah komponen geser matriks bahan.

Integrasi sepanjang tebal pelat, yang diletakkan dalam kurung di persamaan 2-66 dan 2-68, dilakukan dengan membagi pelat menjadi lapisan beton dan baja imajiner, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.23. Bidang perpindahan transversal diasumsikan menerus dalam setiap elemen pelat sehingga tidak ada gap antar lapisan. Setiap lapis dapat memiliki sifat bahan yang berbeda, meskipun diasumsikan konstan sepanjang tebal lapisan.

Integral sepanjang tebal pelat dapat diselesaikan dengan menjumlahkan seluruh lapisan.

$$[\bar{D}_P] = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^{n_c} (\bar{z}_{j+1}^3 - \bar{z}_j^3) \cdot [D_{pc}]_j + \sum_{j=1}^{n_s} \bar{z}_i^2 \cdot [D_s]_i t_i \quad (2-72)$$

dan

$$[\bar{D}_t] = \sum_{j=1}^{n_c} (\bar{z}_{j+1} - \bar{z}_j) \cdot [D_{tc}]_j \quad (2-73)$$

Dengan $\bar{z} = z - (d_{nx} + d_{ny})/2$ untuk penyederhanaan dan n_c dan n_s adalah jumlah total lapisan beton dan baja. $[D_{pc}]_j$ adalah matriks bahan plane stress dari lapisan beton ke-j. $[D_{tc}]_j$ adalah matriks geser transversal bahan lapisan beton ke-j dan $[D_s]_i$ adalah matriks bahan lapisan baja ke-i dengan ketebalannya diperoleh dari persamaan 2-74 didasarkan pada model baja terdistribusi. Baja tulangan hanya berkontribusi pada kekakuan in-plane pelat, sementara aksi dowel dari penulangan diabaikan.

Dalam analisis pelat dengan model lapisan efek lekatan-slip tidak diperhitungkan. Dalam model ini batang tulangan di dalam elemen beton diganti dengan elemen baja ekuivalen dengan distribusi sifat bahan uniaksial di setiap arah penulangan. Elemen baja ekuivalen memiliki dimensi elemen beton dan ketebalan t_s yang ditentukan dari hubungan berikut:

$$t_s = \frac{A_s}{b} = \rho_s \cdot d_e \quad (2-74)$$

dengan A_s = luas penampang melintang satu batang tulangan dalam arah tertentu, b = jarak antara batang tulangan, ρ_s = rasio penulangan, dan d_e = tebal efektif dari elemen.

Sekali perpindahan node dari model elemen hingga ditentukan, persamaan 2.72 dan 2.73. menghasilkan regangan geser in-plane dan regangan geser transversal untuk setiap lapisan. Hubungan ini dapat dirangkum sebagai berikut:

$$\{\varepsilon_c\}_j = \begin{cases} \varepsilon_{xj} = [d_{nx} - \frac{1}{2}(z_{j+1} + z_j)] \cdot \frac{\partial \theta_x}{\partial x} \\ \varepsilon_{yj} = [d_{ny} - \frac{1}{2}(z_{j+1} + z_j)] \cdot \frac{\partial \theta_y}{\partial y} \\ \gamma_{xyj} = [\frac{d}{2} - \frac{1}{2}(z_{j+1} + z_j)] \cdot (\frac{\partial \theta_x}{\partial y} + \frac{\partial \theta_y}{\partial x}) \\ \gamma_{xzzj} = \frac{\partial w}{\partial x} - \theta_x \\ \gamma_{yzzj} = \frac{\partial w}{\partial y} - \theta_y \end{cases} \quad (2-75)$$

$$\{\varepsilon_s\}_t = \begin{cases} (d_{nx} - z_t) \cdot \frac{\partial \theta_x}{\partial x} \\ (d_{ny} - z_t) \cdot \frac{\partial \theta_y}{\partial y} \end{cases} \quad (2-76)$$

Tegangan pada setiap lapis ditentukan dari hubungan tegangan regangan bahan yang berkaitan.

$$\{\sigma_c\}_j = [D_c]_j \cdot \{\varepsilon_c\}_j \quad (2-77)$$

$$\{\sigma_s\}_i = [D_s]_i \cdot \{\varepsilon_s\}_i \quad (2-78)$$

Dengan $\{\sigma_s\}_i$ dan $\{\varepsilon_s\}_i$ merupakan tegangan dan regangan pada bidang tengah z_i dari lapisan baja ke- i , dan $\{\sigma_c\}_j$ dan $\{\varepsilon_c\}_j$ merupakan tegangan dan regangan pada bidang tengah lapisan beton ke- j .

Dalam algoritma analisis nonlinier yang digunakan, hubungan konstitutif nonlinier terpenuhi melalui koreksi iterasi. Dalam setiap iterasi tegangan ditentukan dari peningkatan regangan yang berhubungan pada akhir dari langkah iterasi sebelumnya, sedangkan property bahan hanya diupdated pada awal dari langkah pembebanan berikutnya.

Tegangan yang ditentukan selama fase iterasi algoritma dalam masalah nonlinier umumnya tidak dalam kesetimbangan dengan beban diterapkan. Hasilnya adalah gaya *nodal* yang tidak seimbang. Hal ini dikoreksi selama proses iterasi berikutnya hingga terpenuhinya

toleransi yang ditentukan. Gaya-gaya *nodal* yang tidak seimbang adalah perbedaan antara gaya yang bekerja dan yang menahan atau yang setara.

$$\{R\}_{unbalanced} = \{R\}_{applied} - \{R\}_{equivalent} \quad (2-79)$$

Gaya *nodal* penahan secara statika setara dengan bidang tegangan yang dihasilkan dari keadaan deformasi yang terjadi pada model elemen hingga. Gaya *nodal* penahan ditentukan dari:

$$\{R\}_{equivalent} = \int_A [B_p]^T \cdot \{\bar{\sigma}_p\} dA + \int_A [B_t]^T \cdot \{\bar{\sigma}_t\} dA \quad (2-80)$$

Dan integrasi sepanjang tebal pelat diwujudkan melalui penjumlahan seluruh lapisan beton dan baja imajiner.

$$\{\bar{\sigma}_p\} = \begin{cases} \bar{\sigma}_x = \sum_{j=1}^{n_c} \frac{1}{2} \left[(z_{j+1} - d_{nx})^2 - (z_j - d_{nx})^2 \right] \cdot \sigma_x + \sum_{i=1}^{n_s} (z_i - d_{nx}) \cdot \sigma_x \cdot t_i \\ \bar{\sigma}_y = \sum_{j=1}^{n_c} \frac{1}{2} \left[(z_{j+1} - d_{ny})^2 - (z_j - d_{ny})^2 \right] \cdot \sigma_y + \sum_{i=1}^{n_s} (z_i - d_{ny}) \cdot \sigma_y \cdot t_i \\ \bar{\tau}_{xy} = \sum_{j=1}^{n_c} \frac{1}{2} \left[(z_{j+1} - \frac{d}{2})^2 - (z_j - \frac{d}{2})^2 \right] \cdot \tau_{xy} \end{cases} \quad (2-81)$$

$$\{\bar{\sigma}_t\} = \begin{cases} \bar{\sigma}_{zx} = \sum_{j=1}^{n_c} (z_{j+1} - z_j) \cdot \tau_{zx} \\ \tau_{zy} = \sum_{j=1}^{n_c} (z_{j+1} - z_j) \cdot \tau_{zy} \end{cases} \quad (2-82)$$

2.4.3 Perilaku lentur pelat beton serat kinerja tinggi

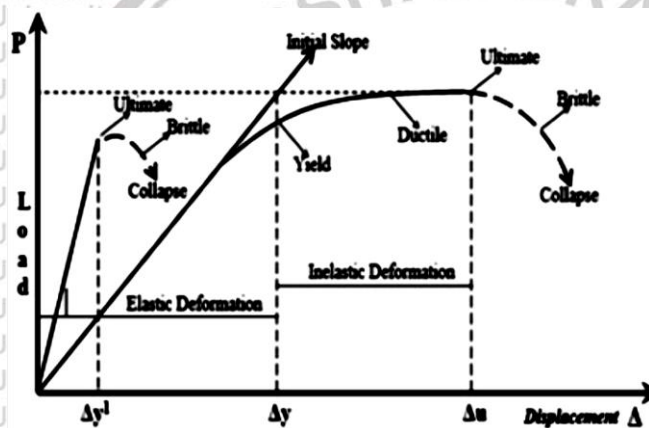
Kekuatan dan regangan beton dibawah tegangan tarik akibat lentur merupakan parameter yang harus dipertimbangkan oleh desainer struktur atau pengembang yang dihadapkan pada masalah praktis atau teoritis akibat penggunaan bahan beton bertulang.

Kekuatan beton dalam menahan tegangan tarik akibat lentur sangat penting untuk mengatasi masalah peningkatan berat struktur. Meskipun kekuatan menahan tarik murni, f_t atau tarik terpusat merupakan kepentingan praktis yang tinggi, namun kedua kuantitas karakteristik ini jarang digunakan karena: 1) adanya kebutuhan spesimen pengujian silinder prismatik dengan bentuk ujung yang kompleks, dimana sampel harus terikat antara kedua penjepit mesin penguji; 2) kesulitan untuk mendapatkan distribusi tegangan pada penampang melintang, karena bidang tegangan terganggu oleh penjepit eksentris spesimen pengujian antara penjepit mesin uji, dan kurangnya homogenitas struktur beton. Untuk mengatasinya digunakan uji tarik belah silinder untuk mendapatkan nilai kuat tarik belah f_{ct} atau menggunakan nilai kuat tarik lentur dari benda uji yang mengalami tegangan lentur, f_{lt} . Namun, kedua prosedur tersebut tidak dapat menjelaskan perkembangan tegangan terkait dengan elemen yang mengalami tarik terpusat, dan konsekuensinya, nilai dari kekuatan yang terkait berbeda dengan nilai kekuatan tarik langsung, f_t (Avram, Facaoaru, Filimon, Mirsu, & Terteau, 1981).

Aulia & Rinaldi (2015) melakukan penelitian untuk menentukan kapasitas lentur dari balok beton bertulang kinerja tinggi dengan penambahan tiga jenis serat sintetis yang ramah lingkungan, yaitu serat *polypropylene*, serat kawat, dan serat karet bekas ban. Salah satu parameter utama dalam menentukan kemampuan dan kinerja struktural dari beton serat kinerja tinggi adalah daktilitas. Daktilitas adalah kemampuan elemen struktur untuk menyalurkan deformasi paska leleh sebelum runtuh dan bisa menjadi parameter utama untuk mengontrol level kerusakan. Perilaku getas dan daktil element beton bertulang dapat dilihat pada Gambar 2.24. Daktilitas element struktur (μ) dapat dihitung dengan persamaan

$$\mu = \Delta u / \Delta y \quad (2-83)$$

dengan Δu adalah regangan ultimit tulangan lentur dan Δy adalah regangan leleh dari tulangan. Penggunaan serat sintetis menghasilkan peningkatan kapasitas lentur dan kapasitas defleksi secara signifikan. Serat sintetis dapat memperlama pencapaian regangan leleh pada saat beban lebih tinggi (Aulia & Rinaldi, 2015).



Gambar 2. 24 Diagram beban-perpindahan getas dan daktil element beton bertulang

Sumber: Aulia & Rinaldi (2015)

Beban yang lebih tinggi pada regangan leleh tulangan balok serat, menunjukkan serat dapat bekerja sebagai penulangan lentur mikro. Balok beton bertulang berkinerja tinggi memiliki regangan lebih kecil dan beban yang lebih rendah pada penulangan tekan lentur dibandingkan dengan regangan dan beban pada penulangan tarik lentur. Hal ini menyebabkan regangan baja pada beban maksimum tidak dapat tercatat karena *strain gauges* rusak akibat tekanan sangat tinggi pada daerah tekan balok.

Pada penelitian beton kinerja tinggi menggunakan serat *fiberglass* untuk aplikasi pada pelat tipis terlihat bahwa lokasi retak utama terjadi setelah puncak diagram tegangan-regangan. Mekanisme bukaan tergantung pada pengankuran serat dalam matriks dan seberapa baik posisi serat dalam retak utama (Rigaud, Chanvillard, & Chen, 2012). Defleksi ultimit yang didapat sebelum keruntuhan serat bukanlah sifat bahan, namun merupakan sifat

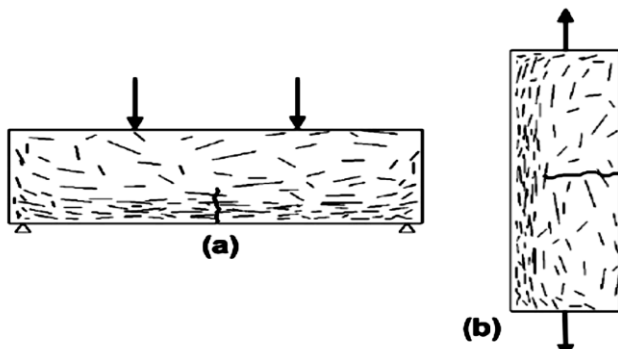
struktural. Segera setelah retak terdistribusi seragam dalam wilayah pusat spesimen, defleksi ultimit tercapai. Konsekuensinya, plat yang lebih panjang akan secara langsung meningkatkan defleksinya dan mendapatkan retak berlipat. *Modulus Young's (E)* dapat dihitung dari perilaku elastik dengan persamaan:

$$E = \frac{F a}{48 \delta l} [(3L^2 - 4a^2) + 4,8h^2 (1 + \nu)] \quad (2-84)$$

Dalam perhitungan tersebut terlihat pengaruh tegangan geser di luar wilayah pusat pelat. F menggambarkan beban, h adalah tebal pelat, δ adalah defleksi, I adalah momen inersia, ν adalah Rasio Poisson dan L adalah bentang spesimen uji, serta a adalah jarak dua titik beban.

Tailhan, Rossi, & Boulay (2012) meneliti penentuan sifat *strain-hardening* dari bahan menggunakan uji tarik yang dikembangkan dalam hubungannya dengan analisis terbalik berbasis metode elemen hingga, serta parameter masukan yang diadaptasi dari model numerik yang dapat diidentifikasi. Simulasi numerik dapat dilakukan untuk menggambarkan perilaku lentur dari pelat tipis. Dalam penelitiannya dikenalkan *Multi-Scale Cement Based Composite (MSCC)* yang diperoleh dengan memasukkan prosentase serat baja yang tinggi dalam matriks beton kinerja ultra-tinggi (dengan kuat tekan lebih dari 250 MPa). Penelitian menunjukkan bahwa model mekanik yang memperhitungkan perilaku elasto-plastik 'klasik' dengan *strain hardening* ini masih relevan untuk merancang struktur yang dibuat dengan materi *MSCC*. Spesimen yang diuji lentur berukuran panjang 600 mm, lebar 200 mm dan tebal 40 mm. Rasio lebar spesimen terhadap panjang serat terpanjang adalah (200/25) dan prosedur pengecoran spesimen memungkinkan orientasi ortotropik serat dari elemen pelat. Rata-rata modulus keruntuhan adalah 50 MPa.

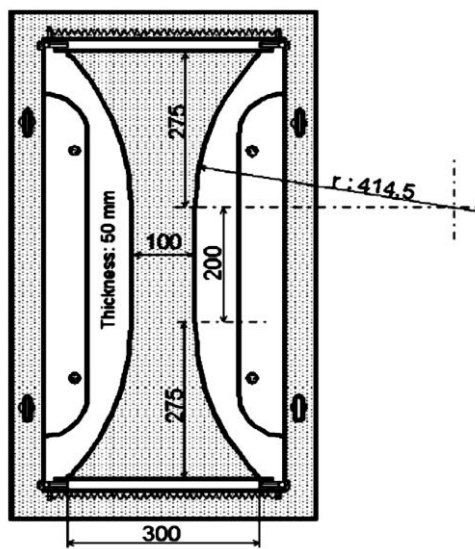
Bahan terlihat tetap elastis hingga mendekati 45% beban maksimum. Bahan menjadi menarik saat perilaku *hardening* (antara 45% hingga 100% beban maksimum) terjadi. Pada beban maksimum, regangan maksimum yang diukur (menggunakan transduser perpindahan dengan panjang 140 mm) pada permukaan bawah spesimen sebesar 5×10^{-3} . Tidak terlihat adanya retakan hingga 60% beban maksimum. Saat beban puncak, akhirnya terlihat retakan sebagai penanda lokasi retak (Gambar 2.25).



Gambar 2. 25 Pengaruh orientasi serat pada lokasi retak; (a) Akibat uji lentur empat titik dan (b) Akibat uji tarik uniaksial.

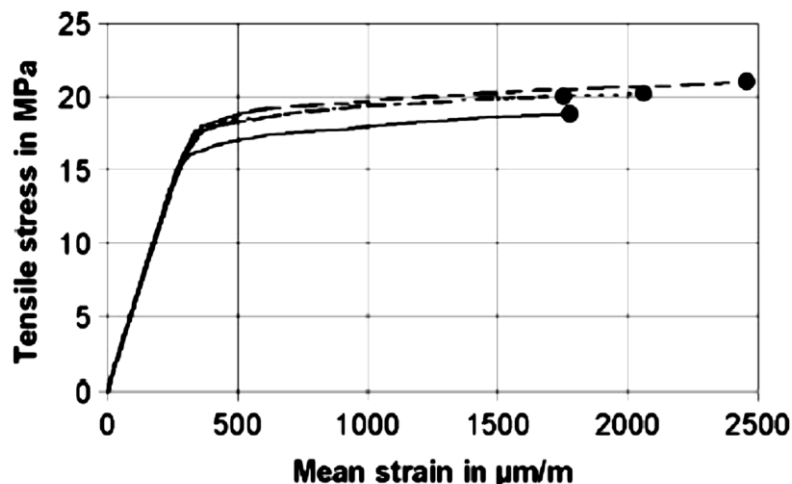
Sumber: Tailhan et al. (2012)

Sedang spesimen uji tarik langsung berukuran ketebalan 5 cm, lebar 10, dan panjang 20 cm, di daerah mana ketegangan dan tegangan bidang harus seragam. Selain itu, spesimen harus memiliki lebar 30 cm di ujungnya (sehingga tegangannya tiga kali lebih rendah dari daerah dimana pengukuran regangan dilakukan). Benda uji dan hasil uji tarik langsung dapat dilihat pada Gambar 2.26 dan Gambar 2.27.



Gambar 2. 26 Geometri cetakan spesimen uji tarik uniaksial

Sumber: Tailhan et al. (2012)



Gambar 2. 27 Diagram tegangan-regangan empat spesimen yang diuji tarik uniaksial.
Sumber: Tailhan et al. (2012)

Gambar 2.27 menunjukkan empat diagram tegangan-regangan yang diperoleh dengan empat spesimen yang diuji. Hanya perilaku tegangan pra-puncak yang dianggap. Ini menegaskan bahwa bahan tersebut mengalami *strain-hardening* saat terjadi tegangan tarik langsung.

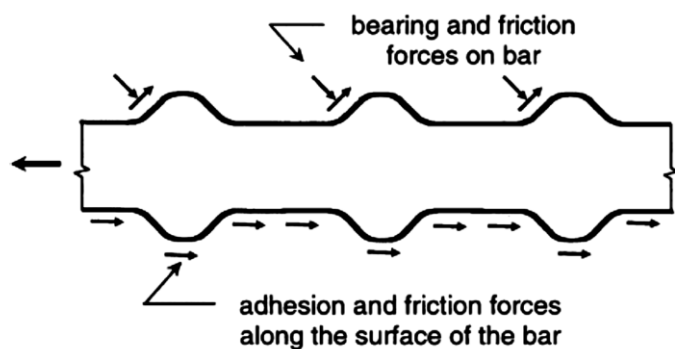
2.5 Tegangan Lekat (*Bond Stress*) Beton dan Baja Tulangan

Tegangan lekat (*Bond Stress*) adalah tegangan sepanjang *interface* beton dan batang tulangan yang memodifikasi tegangan sepanjang permukaan baja tulangan dengan jalan menyalurkan beban antara tulangan dan beton di sekitarnya. Tegangan lekat di elemen beton bertulang muncul dari dua situasi yang berbeda, yaitu: 1) pengankuran (*anchorage*) atau penyaluran (*development*) saat batang tulangan dihentikan; 2) lekatan lentur atau perubahan gaya sepanjang tulangan karena perubahan momen lentur sepanjang elemen tersebut (ACI 408.2R-12, 2012).

Dalam konstruksi beton bertulang, penyaluran gaya antara beton dan tulangan yang layak dan efisien diperlukan untuk perancangan optimal. Penyaluran gaya dari tulangan ke beton sekitarnya, terjadi pada tulangan ulir (Gambar 2.28) akibat: 1) Adhesi kimia antara beton dan baja tulangan; 2) Gaya gesek yang timbul dari kekasaran *interface*; 3) gaya transversal pada permukaan tulangan, dan *slip* relatif antara tulangan dan beton sekitarnya; 4) Pengankuran mekanis atau bantalan dari rusuk terhadap permukaan beton.

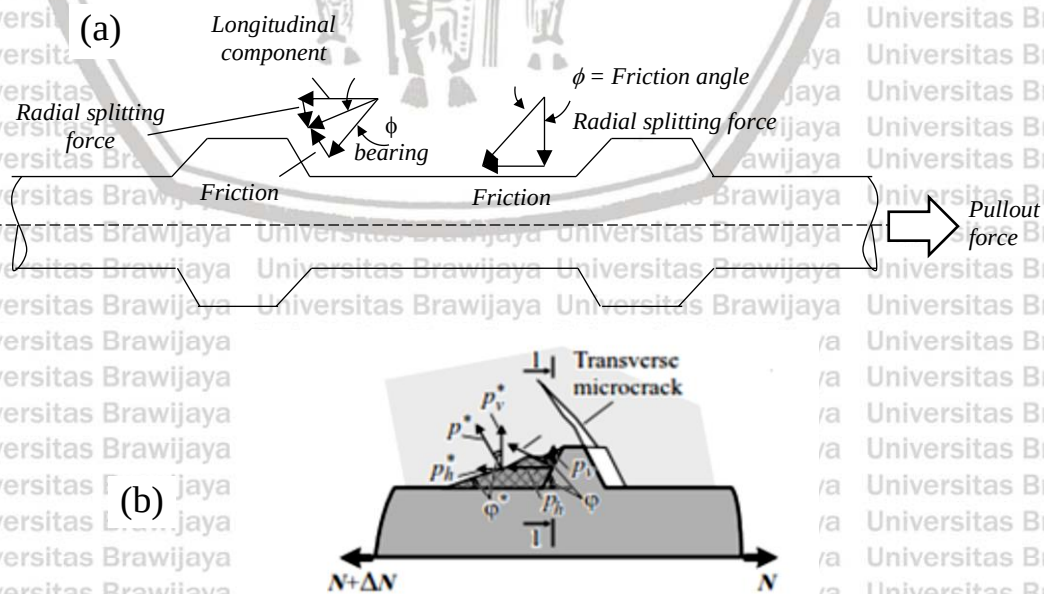
Sesudah *slip* awal tulangan, sebagian besar gaya dialihkan oleh bantalan. Gesekan antara beton dan deformasi tulangan (rusuk) berperan penting dalam pengalihan gaya. Gesekan juga berperan penting untuk batang polos, dengan *slip* diinduksi oleh gesekan yang

dihasilkan dari tegangan transversal pada permukaan tulangan disebabkan oleh variasi pada bentuk tulangan dan kekasaran permukaan (ACI 408R-03, 2003).



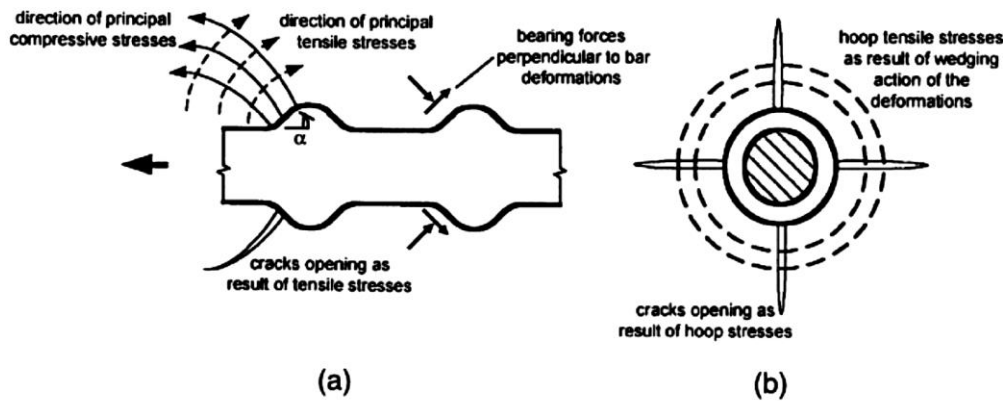
Gambar 2. 28 Mekanisme peralihan gaya lekat
Sumber: (ACI 408R-03, 2003).

Ketika batang ulir (*deformed bar*) bergerak terhadap beton sekitarnya, adhesi permukaan hilang, sementara gaya tumpuan (*bearing force*) pada rusuk (*ribs*) dan gaya gesekan (*friction forces*) pada rusuk (*ribs*) dan laras (*barrel*) tulangan dimobilisasi. Gaya tekan tumpuan pada tulang rusuk meningkatkan nilai dari gaya gesekan. Saat *slip* meningkat, gesekan pada laras batang tulangan direduksi, meninggalkan gaya pada permukaan kontak antara tulang rusuk dan beton sekitarnya sebagai mekanisme utama penyaluran gaya. Gaya pada permukaan tulangan diseimbangkan melalui tegangan tekan dan geser pada permukaan kontak beton, yang diselesaikan menjadi tegangan tarik yang dapat menghasilkan retak pada bidang yang saling tegak lurus dan sejajar dengan penulangan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.29 (Ahmad, 2016).



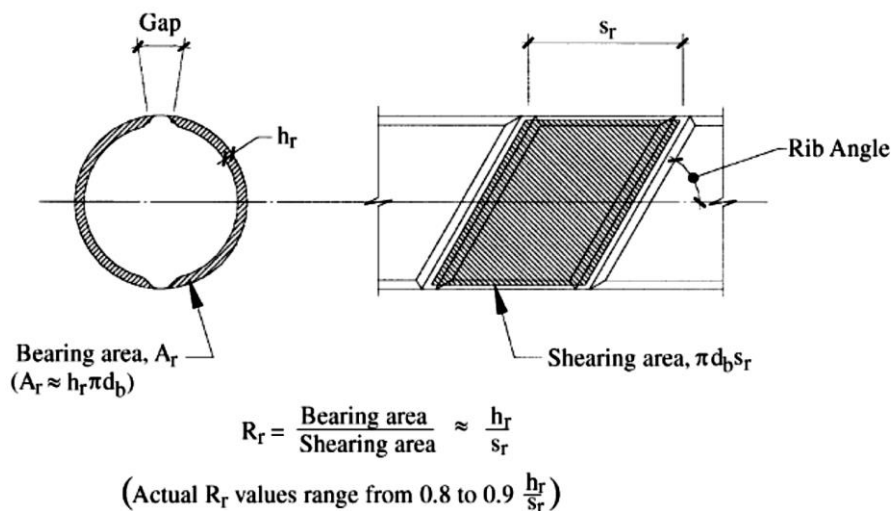
Gambar 2. 29 (a) Gaya yang bekerja pada interface (b) Aksi mengganjai pada rusuk
Sumber: (Ahmad, 2016)

Perlawanan lekat pada Gambar 2.30 diatur oleh: sifat mekanis beton; volume beton di sekitar tulangan; adanya pengekanan (*confinement*) dalam bentuk tulangan transversal; kondisi permukaan tulangan; dan geometri tulangan (tinggi deformasi, jarak, lebar, dan sudut permukaan) (ACI 408R-03, 2003).



Gambar 2.30 Mekanisme kerusakan dan retak pada lekatan: (a) Pandangan samping batang ulir dengan sudut muka deformasi menunjukkan retak Goto (1971); (b) Pandangan ujung menunjukkan pembentukan retak membelah sejajar dengan tulangan. Sumber: (ACI 408R-03, 2003).

Parameter untuk menggambarkan geometri tulangan disebut dengan daerah rusuk relatif R_r , diilustrasikan pada Gambar 2.31, yang merupakan rasio dari daerah bantalan dari deformasi tulangan ke daerah geser antara deformasi.



Gambar 2.31 Definisi dari daerah rusuk relatif R_r . Sumber: (ACI 408R-03, 2003).

Perbedaan gaya tarik ΔT antara dua penampang yang terletak pada retak lentur sepanjang elemen (Gambar 2.32) dihitung sebagai:

$$\Delta T = T_1 - T_2 = \frac{M_1}{jd_1} - \frac{M_2}{jd_2} \quad (2-85)$$

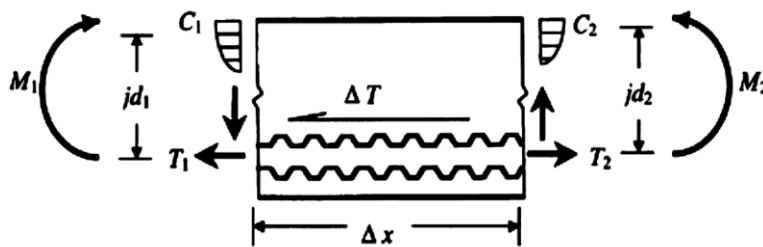
Dengan T_i ($T_2 > T_1$), M_i ($M_2 > M_1$) dan jd_i adalah gaya tarik, momen, dan lengan momen internal pada penampang i ($i=1,2$). Untuk jarak yang sangat kecil antar penampang 1 dan 2, persamaan (2-85) menjadi

$$dT = \frac{dM}{jd} \quad (2-86)$$

Jika gaya lekat per satuan panjang U didefinisikan sebagai perubahan gaya tarik per satuan panjang, maka:

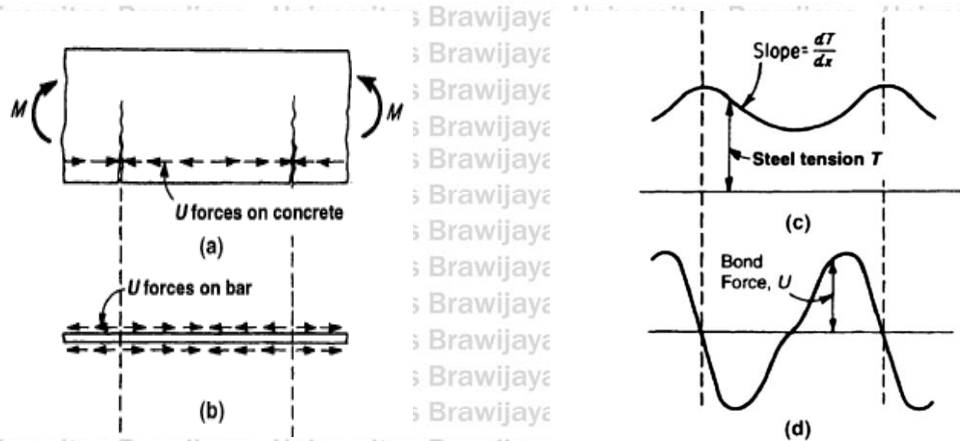
$$U = \frac{dT}{dl} = \frac{1}{jd} \frac{dM}{dl} = \frac{1}{jd} V \quad (2-87)$$

Dengan V adalah geser pada penampang. Dari persamaan tersebut mengindikasikan bahwa jauh dari beban terpusat, gaya lekat bervariasi sebagai fungsi dari geser yang bekerja sepanjang elemen lentur beton bertulang.



Gambar 2. 32 Variasi dalam gaya batang akibat perubahan momen balok
Sumber: (ACI 408R-03, 2003).

Perubahan gaya pada batang tulangan dT tidak berbeda jauh dengan perubahan momen persatuan panjang, seperti dalam Persamaan. (2-86), tetapi gaya dalam batang tulangan T , bervariasi dari nilai yang tinggi pada bagian retak menuju nilai rendah di antara retakan, dimana beton berbagi gaya tarik dengan baja tulangan. Menggunakan definisi $U = dT/dl$, gaya lekat bervariasi secara signifikan sepanjang elemen, bahkan dalam berbagai arah (Gambar 2.33). Distribusi kekuatan riil gaya lekat sepanjang batang tulangan tidak dapat diprediksi karena tergantung pada lokasi dari retak lentur dan jumlah beban tarik yang ditahan oleh beton. Mengingat fakta tersebut dan karena tujuan utama dari desain adalah untuk memastikan bahwa batang tulangan terangkur dengan memadai sehingga kegagalan akan memanifestasikan dirinya dalam beberapa cara lain selain pada lekatan.



Gambar 2.33 Variasi gaya lekat beton dan baja dalam elemen beton bertulang lentur murni: (a) Segmen beton retak; (b) Tegangan lekat bekerja pada batang tulangan; (c) Variasi gaya tarik dalam baja; dan (d) Variasi gaya lekat sepanjang batang.

Sumber: (ACI 408R-03, 2003).

Tegangan lekat u adalah gaya lekat per satuan panjang U dibagi dengan jumlah perimeter penyaluran batang tulangan pada penampang Σ_0 .

$$u = \frac{U}{\Sigma_0} = \frac{\Delta T}{\Delta l \Sigma_0} = \frac{\Delta f_s A_b}{\Delta l \Sigma_0} = \frac{\Delta f_s d_b}{4 \Delta l} \quad (2-88)$$

dengan A_b = luas batang tulangan; d_b = diameter batang tulangan; dan Δf_s perubahan dalam tegangan baja sepanjang Δl .

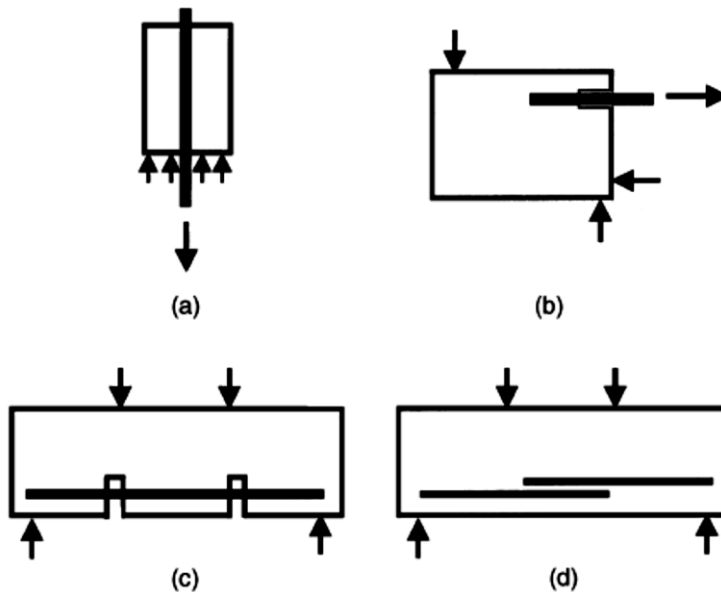
Untuk tujuan desain, perubahan tegangan Δf_s sama dengan tegangan leleh baja f_y dan Δl sama dengan panjang penyaluran l_d . Maksimum tegangan lekat adalah:

$$u = 20 \frac{\sqrt{f'_c}}{d_b} \leq 5,52 \text{ MPa} \quad (2-89)$$

Substitusi persamaan (2-89) ke dalam persamaan (2-88), penyelesaian untuk $\Delta l = l_d$, dan kalikan nilai resultannya dengan 1,2 untuk menghitung reduksi tegangan lekat karena kedekatan jarak tulangan (karena interaksi retak belah) memberikan persamaan panjang penyaluran

$$l_d = 0,019 A_B \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} \quad (2-90)$$

Persamaan (2-90) digunakan untuk desain. Berbagai konfigurasi benda uji telah digunakan untuk mempelajari lekatan antara batang tulangan dan beton. Keempat konfigurasi yang paling umum ditunjukkan pada Gambar 2.34. Rincian dari spesimen mempengaruhi tidak hanya kuat lekat yang diukur, tetapi juga sifat respon lekatan (ACI 408R-03, 2003).



Gambar 2. 34 Skematik dari: (a) Spesimen *pullout*; (b) Spesimen ujung balok; (c) Spesimen angkur pada balok; (d) Spesimen sambungan lewatan.
Sumber: (ACI 408R-03, 2003)

Spesimen *pullout* pada Gambar 2.34(a) banyak digunakan karena kemudahan fabrikasi dan kesederhanaan pengujian. Saat batang tulangan mengalami tegangan tarik, beton mengalami tegangan tekan. Selanjutnya, penopang tekan akan terbentuk di antara titik-titik tumpuan beton dan permukaan batang tulangan, sehingga permukaan batang tulangan berada dalam tegangan tekan. Spesimen balok kantilever dimodifikasi atau spesimen ujung balok Gambar 2.34(b) menduplikasikan keadaan tegangan dalam elemen beton bertulang. Spesimen tersebut proporsional untuk memenuhi persyaratan jarak antara batang tulangan dan gaya tekan dan diperkuat untuk memastikan terjadinya gagal lekatan terlebih dahulu sebelum gagal lentur atau gagal geser. Spesimen angkur Gambar 2.34(c) mensimulasikan elemen dengan retak lentur dan dikenal sebagai panjang lekatan. Spesimen sambungan Gambar 2.34(d), biasanya dibuat dalam wilayah momen konstan, lebih mudah untuk dibuat dan menghasilkan kekuatan lekat yang sama dengan yang diperoleh dengan spesimen angkur.

Beberapa peneliti telah mengusulkan persamaan untuk menjabarkan kuat lekat beton dan baja tulangan, dengan dan tanpa pengikatan tulangan sengkang. Orangun, Jirsa, & Breen (1977) mengembangkan persamaan untuk menghitung panjang sambungan lewatan batang ulir menggunakan analisis regresi nonlinier pada hasil pengujian balok dengan sambungan lewatan. Darwin, Zuo, Tholen, & Idun (1996) mengembangkan persamaan kuat lekat saat runtuh sebagai fungsi kuat tekan beton, tebal selimut beton, jarak batang tulangan, panjang

penyaluran/sambungan, tulangan sengkang, dan sifat geometri dari batang sambungan/penyaluran. Zuo & Darwin, (2000) mengevaluasi pengaruh dari kekuatan beton, kuantitas dan jenis agregat kasar, dan geometri tulangan pada kuat lekat. Esfahani & Rangan mengembangkan persamaan kuat lekat batang tulangan tanpa pengikat tulangan sengkang. Penelitian juga dilakukan terhadap pengaruh dari penulangan transversal pada kuat lekat sambungan lewatan. Rangkuman persamaan tersebut dijadikan acuan dalam ACI 408R-03 tentang *bond and development of straight reinforcing bars in tension* (Esfahani & Rangan, 2000). persamaan-persamaan kuat lekat (*bond-strength*) batang tulangan dengan atau tanpa tulangan sengkang dan kondisi batas persamaannya dirangkum dalam Tabel 2.10.

Tabel 2. 10 Persamaan Kuat Lekat (*Bond Strength*) Batang Tulangan

No.	Peneliti/Peraturan	Penulangan	Rumusan kuat lekat
1	(Orangun et al., 1977)	tanpa tulangan sengkang kondisi batasan persamaan	$\frac{u_c}{\sqrt{f'_c}} = 0,101 + 0,268 \frac{c_{min}}{d_b} + 4,4 \frac{d_b}{l_d}$ $\frac{1}{d_b} = \left(c_{min} + 0,4 d_b + \frac{f_{yt} A_{tr}}{10,34 s n} \right) \leq 2,5$ c_{min} = selimut beton minimum terkecil atau ½ jarak bersih antara batang tulangan (mm); l_d = panjang penyaluran atau panjang penyambungan (mm); d_b = diameter batang tulangan (mm); u_c = kuat lekat (<i>bond strength</i>) dalam MPa; f'_c = kuat tekan silinder beton (MPa); A_{tr} = Luas tulangan sengkang tegak lurus bidang belah melalui batang tulangan utama (mm²); f_{yt} = kuat leleh baja sengkang (MPa); s = jarak antar sengkang (mm). n = jumlah batang tulangan pada lokasi yang sama yang disalurkan atau disambung.
2	(Darwin et al., 1996)	tanpa tulangan sengkang kondisi batasan persamaan	$\frac{u_c}{f'_c} = \frac{A_b f_s}{f'_c} = [1,5 l_d (c_{min} + 0,5 d_b) + 51 A_b] \left(0,1 \frac{c_{max}}{c_{min}} + 0,9 \right) \text{ dengan } \left(0,1 \frac{c_{max}}{c_{min}} + 0,9 \right) \leq 1,25$ $\frac{1}{d_b} \left[(c_{min} + 0,5 d_b) \left(0,1 \frac{c_{max}}{c_{min}} + 0,9 \right) + \left(\frac{35,3 t_r t_d A_{tr}}{s n} \right) \right] \leq 4,0$
3	(Zuo & Darwin, 2000)	tanpa tulangan sengkang kondisi batasan persamaan	$\frac{u_c}{f'_c} = \frac{A_b f_s}{f'_c} = [1,43 l_d (c_{min} + 0,5 d_b) + 56,2 A_b] \left(0,1 \frac{c_{max}}{c_{min}} + 0,9 \right)$ $\frac{1}{d_b} \left[(c_{min} + 0,5 d_b) \left(0,1 \frac{c_{max}}{c_{min}} + 0,9 \right) + \left(\frac{6,26 t_r t_d A_{tr}}{s n} \right) f_c^{1/2} \right] \leq 4,0$

4	(Esfahani Rangan, 2000)	& tanpa tulangan sengkang Untuk $f'_c < 50 \text{ MPa}$	$\frac{u_c}{\sqrt{f'_c}} = \frac{A_b f_s}{\sqrt{f'_c}}$ $= 2,7 \pi l_d \frac{(c_{min} + 0,5 d_b) \left(1 + \frac{1}{M}\right)}{\left(\frac{c_{min}}{d_b} + 3,6\right) (1,85 + 0,024 \sqrt{M})} \left(0,12 \frac{c_{med}}{c_{min}} + 0,88\right)$ dengan c_{min} = minimum (c_{s0}, c_b, $c_{si} + d_b/2$), c_{med} = median atau nilai tengah dari (c_{s0}, c_b, $c_{si} + d_b/2$), $M = \cosh(0,0022 l_d \sqrt{r f'_c / d_b})$, Untuk penulangan konvensional ($R_r \approx 0,07$), $r = 3$. Cosinus hyperbolic dimasukkan dalam hubungan didasarkan pada asumsi variasi tegangan lekat pada panjang penyaluran atau penyambungan dari batang tulangan.
		untuk $f'_c \geq 50 \text{ MPa}$	$\frac{u_c}{\sqrt{f'_c}} = \frac{A_b f_s}{\sqrt{f'_c}}$ $= 4,73 \pi l_d \frac{(c_{min} + 0,5 d_b) \left(1 + \frac{1}{M}\right)}{\left(\frac{c_{min}}{d_b} + 5,5\right) (1,85 + 0,024 \sqrt{M})} \left(0,12 \frac{c_{med}}{c_{min}} + 0,88\right)$
5	(ACI 2003)	tanpa tulangan sengkang kondisi batasan persamaan	$\frac{u_c}{f'_c{}^{1/4}} = \frac{A_b f_s}{f'_c{}^{1/4}} = [1,43 l_d (c_{min} + 0,5 d_b) + 57,4 A_b] \left(0,1 \frac{c_{max}}{c_{min}} + 0,9\right)$ $\frac{1}{d_b} \left[(c_{min} + 0,5 d_b) \left(0,1 \frac{c_{max}}{c_{min}} + 0,9\right) + \left(\frac{6,26 t_r t_d A_{tr}}{s n}\right) f'_c{}^{1/2} \right] \leq 4,0$

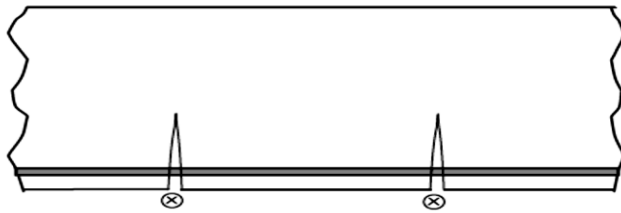
Kuat lekat sebenarnya lebih dipengaruhi oleh *fracture* energi yang secara implisit dimasukkan dalam persamaan peraturan. Peraturan juga tidak membahas tentang model *slip* akibat beban dan tidak menentukan spesimen untuk menentukan karakteristik lekatan (Ahmad, 2016).

2.6 Retak pada Pelat Beton Serat Kinerja Tinggi

Retak terjadi ketika tegangan tarik elemen beton mencapai kuat tariknya. Beban yang ditahan beton sebelum retak ditransferkan ke tulangan yang melintasi retakan. Untuk elemen simetris, gaya dalam elemen saat retak adalah (ACI 224.2R-92, 1997):

$$P = (1 - \rho + n\rho) A_g f'_t \quad (2-91)$$

dengan P = gaya dalam elemen; A_g = luas penampang beton; A_s = luas penampang baja; f'_t = kuat tarik beton; n = rasio modulus elastisitas baja terhadap beton; $\rho = A_s/A_g$ = rasio tulangan.



Gambar 2. 35 Tipe retakan lentur akibat gaya luar.

Sumber: (Piyasena, 2002)

Sesudah retak, jika gaya yang bekerja tidak berubah, tegangan baja saat retak adalah:

$$f_s = \frac{P}{A_s} = \left(\frac{1}{\rho} - 1 + n \right) f'_t \quad (2-92)$$

Metode untuk menentukan tegangan tarik beton polos dapat diklasifikasikan menjadi salah satu kategori berikut: 1) tarik langsung; 2) tarik lentur; dan 3) tarik tidak langsung.

Sulitnya mengaplikasikan gaya tarik murni pada spesimen beton polos, menyebabkan tidak ada pengujian standard untuk tarik langsung. Pengukuran kekuatan tarik bisa dilakukan dengan menguji lentur balok beton polos (ASTM C 293-02, 2002 dan ASTM C 78-02, 2002). Pengukuran kekuatan tarik tak langsung bisa diperoleh dengan uji tarik belah (ASTM C 496/C496M-04, 2004). Nilai representasi dari kuat tarik yang didapat dari pengujian dan pengukuran bisa dilihat pada Tabel 2.11.

Tabel 2. 11 Variabilitas Kuat Tarik Beton

Tipe pengujian	Kuat rata-rata (MPa)	Standard Deviasi	Prosentase koefisien variasi
Uji tarik belah	2,8	0,14	5
Uji tarik langsung	1,9	0,13	7
Modulus keruntuhan	4,2	0,25	6
Uji tekan kubus	42	1,45	3,5

Sumber: (ACI 224.2R-92, 1997)

Tabel 2.12 menunjukkan hubungan antara kuat tekan dan kuat tarik beton. Uji modulus keruntuhan menggunakan pengujian *third-point loading*.

Tabel 2. 12 Hubungan antara Kuat Tekan dan Kuat Tarik Beton

Kuat tekan silinder (MPa)	Rasio kekuatan		
	Modulus keruntuhan terhadap kuat tekan	Kuat tarik langsung terhadap kuat tekan	Kuat tarik langsung terhadap modulus keruntuhan
6,9	0,23	0,11	0,48
13,8	0,19	0,10	0,53
20,7	0,16	0,09	0,57
27,6	0,15	0,09	0,59
34,5	0,14	0,08	0,59
41,4	0,13	0,08	0,60
48,2	0,12	0,07	0,61
55,1	0,12	0,07	0,62
62,0	0,11	0,07	0,63

Sumber: (ACI 224.2R-92, 1997)

ACI 209R-92 (1997) menyarankan beberapa persamaan untuk memperkirakan modulus keruntuhan, kuat tarik langsung, dan modulus elastisitas pada $0,4 (f'_c)_t$, masing-masing pada berat beton yang berbeda, sebagai fungsi dari kuat tekan:

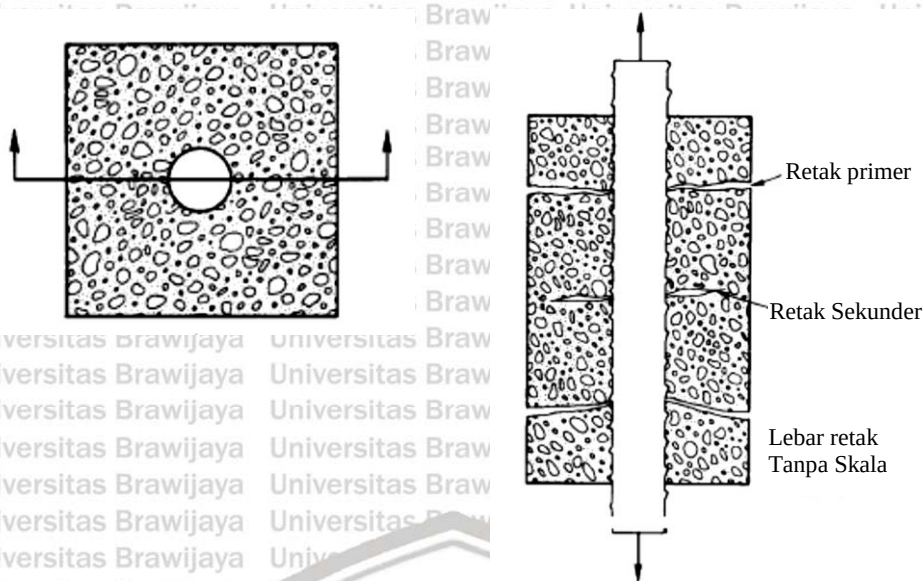
$$\text{Modulus of rupture: } f_r' = g_r [w_c (f'_c)]^{1/2} \quad (2-93)$$

$$\text{Kuat tarik langsung: } f_t' = g_t [w_c (f'_c)]^{1/2} \quad (2-94)$$

$$\text{Modulus elastisitas: } E_{ct} = g_{ct} [w_c^3 (f'_c)_t]^{1/2} \quad (2-95)$$

dengan: w_c = berat jenis beton (kg/m^3); $(f'_c)_t$ = kuat tekan beton (MPa); $g_r = 0,012$ hingga $0,021$; $g_t = 0,0069$; dan $g_{ct} = 0,043$. Hasil uji lentur maupun uji belah yang diperoleh dari keruntuhan spesimen uji secara tiba-tiba, mengindikasikan sifat getas alami beton akibat tegangan tarik.

Ketika elemen beton bertulang mengalami tegangan tarik, dua jenis retakan akan terjadi (Gambar 2.36). Jenis pertama adalah retakan yang terlihat pada permukaan beton (retak primer), sedangkan jenis lainnya tidak muncul ke permukaan beton (retak sekunder). Sebagai hasil pembentukan retak pada elemen tegangan tarik, pola tegangan baru berkembang diantara retakan. Pembentukan retak primer tambahan terus terjadi saat tegangan meningkat hingga jarak retak mendekati dua kali ketebalan selimut beton yang diukur ke arah pusat tulangan beton.



Gambar 2. 36 Retak primer dan sekunder pada elemen beton bertulang yang mengalami tegangan tarik

Sumber: (ACI 224.2R-92, 1997)

Terdapat variasi pada jarak retak eksternal. Variabilitas kekuatan tarik beton, integritas ikatan tulangan, dan kedekatan retak primer sebelumnya, yang cenderung menurunkan tegangan tarik lokal dalam beton, adalah penyebab utama dari variasi ini pada jarak retakan.

Untuk kisaran selimut beton normal antara 30 sampai 75 mm. Jarak rata-rata retakan tidak akan mencapai batas nilai dua kali selimut beton sebelum tegangan penulangan mencapai 138-200 MPa. Nilai yang diharapkan dari jarak retak maksimum adalah sekitar dua kali lipat dari jarak retak rata-rata. Artinya, jarak retak maksimum sama dengan sekitar empat kali ketebalan selimut beton. Rentang jarak retak lebih dari 20 persen lebih besar dari yang diamati untuk elemen lentur (ACI 224.2R-92, 1997).

Lebar retak maksimum yang dapat dianggap tidak mengganggu penampilan struktur tergantung berbagai faktor, diantaranya posisi, panjang, dan tekstur permukaan retak serta pencahayaan daerah sekitarnya. Lebar retak di kisaran 0,25 mm sampai 0,38 mm mungkin dapat diterima untuk alasan estetika (Piyasena, 2002). Karena variabilitas lebar retak yang besar pada elemen tegangan tarik, lebar retak maksimum pada tegangan tarik langsung diharapkan lebih besar di banding lebar retak maksimum akibat lentur pada saat tegangan baja yang sama. Lebar retak yang lebih besar pada elemen tarik dimungkinkan karena kurangnya ketahanan retak pada daerah kompresi elemen lentur. Kemiringan tegangan dalam elemen lentur menyebabkan retakan dimulai pada lokasi yang paling tegang dan berkembang secara bertahap dibanding pada elemen tarik dengan tegangan yang seragam (ACI 224.2R-92, 1997).

2.6.1 Persamaan lebar retak maksimum

Perkembangan rumusan prediksi jarak dan lebar retak biasanya didasarkan pada perhitungan distribusi tegangan beton pada daerah tarik elemen. Beberapa peneliti menggunakan prosedur analitis untuk menentukan tegangan tarik beton. Selanjutnya eksperimen dilaksanakan untuk memverifikasi rumusan yang baru. Dalam banyak penelitian, elemen tarik uniaksial digunakan untuk mensimulasi kondisi sekitar batang baja dalam wilayah momen konstan elemen. Dalam penelitian eksperimen, batang baja pada sumbu prisma beton dikenai gaya tarik pada kedua ujungnya. Retak tarik yang dihasilkan dianggap sebagai gambaran retak lentur dalam wilayah momen balok. Distribusi tegangan tarik aksial dalam prisma beton diperoleh dari perhitungan gaya tarik yang disalurkan oleh batang baja. Distribusi tegangan ini selanjutnya digunakan untuk memprediksi rumusan retak baru diantara retakan yang ada sebagaimana terlihat pada Tabel 2.13. (Piyasena, 2002).

Tabel 2. 13 Rumusan Jarak (mm) dan Lebar Retak (mm) yang Diusulkan oleh Beberapa Peneliti

No.	Peneliti	Uraian	fungsi	Rumusan jarak dan lebar retak yang diusulkan
1	(Chi & Kirstein, 1958)	Analisis rerata lebar retak pada level tulangan pada silinder beton bertulang	$s = f(\tau, \phi)$ $w = f(\tau, \phi, f_s, E_s)$ τ = rasio asumsi luas beton tarik efektif terhadap luas batang baja tunggal, bervariasi antara 0,786 dan 1 untuk 16 elemen yang dianalisis	$s_{min} = 5 \tau \phi$ $w_{s,ave} = \frac{5 \tau \phi}{E_s} \left(f_s - \frac{438}{\tau \phi} \right)$ s_{min} = jarak retak minimum (mm); $w_{s,ave}$ = rata-rata lebar retak pada level tulangan (mm); E_s = modulus elastisitas baja (MPa); f_s = tegangan dalam batang baja (MPa); dan ϕ = diameter batang baja (mm)
2	(Broms, 1965)	Analisis Rerata lebar retak pada permukaan tarik pada balok beton tulangan tunggal	$w = f(c, \varepsilon_{s,ave})$	$s_{max} = 2c$; $s_{min} = c$; $s_{ave} = 1,5c$ $w_{t,ave} = 2c \varepsilon_{s,ave}$ $w_{t,ave}$ = lebar retak rata-rata pada permukaan tarik untuk tegangan baja antara 140 hingga 205 MPa. c = tebal selimut beton, $\varepsilon_{s,ave}$ = rata-rata regangan pada batang baja tulangan.

No.	Peneliti	Uraian	fungsi	Rumusan jarak dan lebar retak yang diusulkan
3	(Broms & Lutz, 1965)	Analisis lebar retak maksimum pada permukaan tarik pada balok beton tulangan ganda	$w = f(c, \varepsilon_{s,ave})$	$w_{max} = 4c_{\varepsilon} \varepsilon_{s,ave} = 0,02 \times 10^{-3} f_s d_c \sqrt{1 + \left(\frac{s}{4d_c}\right)^2}$ $w_{t,max}$ = lebar retak maksimum pada permukaan tarik. c_{ε} = tebal selimut beton efektif. $\varepsilon_{s,ave}$ = rata-rata regangan pada batang baja tulangan. d_c = jarak yang diukur dari pusat baja tarik ke arah tegangan tarik maksimum. s = jarak tulangan (mm). f_s = tegangan dalam batang baja (MPa);
4	(Venkateswarlu & Gesund, 1972)	Analisis lebar retak maksimum pada permukaan tarik pada blok beton bertulang	$w = f(\phi, f_s, E_c, E_s, \rho_m)$	$s_{max} = \frac{14,5 \phi}{1+n\rho_m}$ $w_{t,max} = \frac{2,4 \times 10^{-5} \phi (1462-f_s) f_s}{1+n\rho_m (662-f_s)}$ s_{max} = jarak retak maksimum (mm); $n = E_s/E_c$ = rasio modulus elastis baja dan beton, dan ρ_m = rasio modifikasi penulangan. ϕ dalam milimeter dan f_s dalam MPa.
5	(Oh & Kang, 1987)	Analisis lebar retak maksimum pada balok beton bertulang menggunakan kriteria energi mekanika retakan	$w = f(\phi, t_b, h, x, d, \varepsilon_s)$	$s_{ave} = \phi \left\{ 25,7 \left(\frac{t_b}{h-x} \right)^{4,5} + 1,66 \left(\frac{A_0}{A_{s1}} \right)^{1/3} + \frac{0,236 \times 10^{-6}}{\varepsilon_s^2} \right\}$ $w_{t,max} = \phi \left\{ 159 \left(\frac{t_b}{h-x} \right)^{4,5} + 2,83 \left(\frac{A_0}{A_{s1}} \right)^{1/3} \right\} (\varepsilon_s - 0,0002) \frac{(h-x)}{(d-x)}$ ε_s = regangan baja; A_0 = luas efektif beton tarik di sekitar masing-masing batang tulangan (mm ²). $A_0 = A_e/n_b$ dan $A_e = b h_l$; A_{s1} = luasan batang baja ekuivalen; h_l = ketebalan luas ekuivalen (mm) $h_l = \frac{(h-x)^3}{3(d-x)^2}$
6	(Beeby, 1979)	Lebar retak kolom beton tanpa tulangan dikenai aksial dan momen lentur	$w = f(a_{cr}, \varepsilon_m, h, x, c)$	$w_{max} = \frac{3 a_{cr} \varepsilon_m}{(1+2 \frac{(a_{cr}-c)}{(h-x)})}$ a_{cr} = jarak dari permukaan tulangan ke titik dimana lebar retak dihitung. h = ketinggian elemen; dan x = ketebalan daerah tekan, ε_m = regangan rata-rata dalam batang baja antara retakan yang berdekatan; c = selimut beton

No.	Peneliti	Uraian	fungsi	Rumusan jarak dan lebar retak yang diusulkan
7	(Watstein & Parsons, 1943)	Lebar retak akibat uji tarik uniaksial dan dimodifikasi untuk uji silinder, balok beton bertulang, dan pelat satu arah	$w = f(\phi, h, d, f_s, \rho)$	$w_{max} = 1,29 \times 10^{-6} \left(\frac{h-d}{d} \right) \frac{\phi}{\rho} [2,56 f_s - 1\rho + 8]$ Asumsi: $n=8$, d = ketebalan efektif (mm); d , h dan ϕ dalam milimeter, dan f_s dalam MPa.
8	(Kaar & Mattock, 1963)	Lebar retak akibat uji lentur balok beton bertulang	$w = f(A_e, f_s)$	$w_{max} = 1,57 \times 10^{-5} f_s \sqrt[4]{A_e}$ $w_{s,max}$ = lebar retak maksimum pada level penulangan (mm) dan A_e = luasan beton tertarik efektif (mm ²)
9	(Gergely & Lutz, 1968)	Lebar retak berdasar analisis statistik hasil uji berbagai sumber, digunakan oleh ACI 318(1995)	$w = f(A_e, h, t_b, f_s)$	$w_{t,max} = 0,0132 f_s \sqrt[3]{c A_e} \times 10^{-3}$
10	Lan & Ding (1992)	Lebar retak elemen lentur	$w = f(\phi, c, v, \epsilon_s, \psi, \rho_{te})$	$w_{max} = 1,41 (2,7 c + 0,11 \phi / \rho_{te}) v \epsilon_s \psi$ dengan ρ_{te} = rasio penulangan didasarkan pada luas efektif beton tarik. ψ dan v merepresentasikan ketidakseragaman regangan baja dan sifat lekat batang baja. ϵ_s regangan baja pada penampang retak
11	(Chowdhury & Loo, 2001)	Lebar retak rata-rata elemen lentur	$w = f(\phi, c, s_b, \epsilon_s, \rho)$	$w_{max} = 0,9 \epsilon_s (c - s_b) + 0,1 \left(\frac{\phi}{\rho} \right)$ s_b = jarak pusat ke pusat batang tulangan (mm) dan c = tebal selimut beton bersih (mm).
12	(Soehardjono, Raka, & Suprobo, 2006)	Lebar retak pelat satu arah beton bertulang pracetak	$w = f(A_s, f_s, n, \rho)$	$W_{max} = (0,74 - 0,0024 f_s) \cdot 10^{-6} \frac{A_s f_s}{(1 + n\rho)} e^{0,013}$ w_{max} = lebar retak maksimum (mm), f_s = tegangan baja tulangan (MPa), A_s = luas tulangan baja (mm ²), n = angka ekuivalen E_s/E_c , dan ρ = angka tulangan = $A_s/s.h$, s = jarak tulangan (mm), h = tebal pelat (mm).
13	(Frosch, 1999)	Pengembangan persamaan teoritis lebar retak sesuai tebal selimut beton sebenarnya	$w = f(f_s, E_s, d_c, d_s, h, x)$	$w_{max} = 2 \frac{f_s}{E_s} \left\{ \frac{\sqrt{d_c^2 + d_s^2}}{\sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2}} \right\} \frac{h-x}{a-x}$ d_s = selimut samping beton (mm) d_c = selimut beton (mm)

Dari rumusan-rumusan lebar retak yang telah ditampilkan pada Tabel 2.13 terlihat bahwa lebar retak merupakan fungsi beberapa parameter yang mempengaruhi perilaku lentur maupun perilaku lekatan beton dan baja tulangan. Dalam persamaan tersebut yang berperan sebagai pembilang adalah parameter $\{f_s, \phi, c_\varepsilon, \varepsilon_s, A_e, A_s, h, d_c\}$ sedangkan yang berperan sebagai penyebut atau pembagi adalah parameter $\{E_s, n, \rho\}$ dengan f_s = tegangan dalam batang baja (MPa), ϕ = diameter batang tulangan (mm), c_ε = tebal selimut beton efektif, ε_{sm} = regangan baja, A_e = luasan beton tertarik efektif (mm²), A_s = luas tulangan baja (mm²), h = tebal pelat (mm), d_c = jarak yang diukur dari pusat baja tarik ke arah tegangan tarik maksimum, E_s = modulus elastisitas baja (MPa) $n = E_s/E_c$ = rasio modulus elastis baja dan beton ρ = angka tulangan = $A_s/b.h$.

2.6.2 Analisis lebar retak dengan metode *Linear Elastic Fracture Mechanics* (LEFM)

1. *Persamaan faktor intensitas tegangan*

Ketika sebuah retakan mulai berkembang di dalam benda padat, hal ini menjadi bagian dari bidang regangan inelastis atau plastik yang lebih besar. Ketika retak sebenarnya berkembang dan meluas itu adalah karakteristik dari proses retak dimana pertumbuhan panjang retaknya cenderung mendekati perkembangan bidang regangan plastik (Irwin, 1958).

Apabila sebuah pelat dengan ukuran retak yang telah diketahui ditarik hingga fraktur di mesin uji tarik, maka dari beban yang diketahui saat terjadi fraktur, tegangan runtuh σ_c dapat dihitung. Nilai kritis dari faktor intensitas tegangan pada saat terjadi kegagalan diberikan oleh:

$$K_{IC} = \sigma_c \sqrt{\pi a} \quad (2-96)$$

Jika K_{IC} adalah parameter bahan, nilai yang sama harus didapatkan dengan menguji spesimen lain dari bahan yang sama tetapi dengan ukuran retak yang berbeda. Berdasar nilai K_{IC} , kekuatan fraktur berbagai ukuran retak dalam bahan yang sama dapat diprediksi. Juga dapat diprediksi ukuran retakan yang dapat ditoleransi dalam bahan jika diberi tegangan hingga tingkat tertentu.

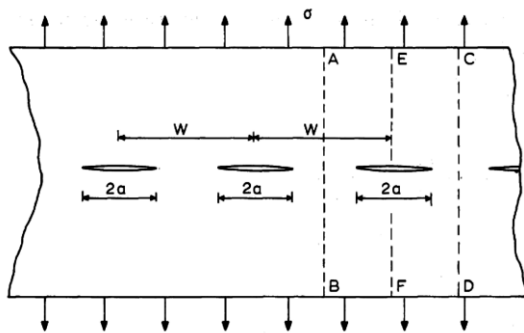
K_{IC} diukur untuk mengetahui ketahanan retak bahan. Oleh karena itu K_{IC} disebut sebagai ketangguhan fraktur (*fracture toughness*). Bahan dengan ketangguhan fraktur rendah hanya dapat mentolerir retakan kecil. Pada kenyataannya situasinya sedikit lebih rumit. Terutama karena persamaan yang digunakan untuk faktor intensitas tegangan hanya berlaku untuk pelat yang tanpa batas. Untuk pelat dengan ukuran tertentu, rumusnya menjadi:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} f(a/W) \quad (2-97)$$

dengan w adalah tebal pelat. Fungsi $f(a/W)$ tentunya dapat diketahui sebelum K_{IC} dapat ditentukan. Tentu saja, $f(a/W)$ mendekati satu untuk nilai a/W kecil. Pembatasan harus dibuat untuk regangan transversal pada pelat. Nilai K_{IC} yang konsisten hanya dapat diperoleh dari pengujian jika perpindahan dalam arah ketebalan pelat dapat di tahan, yaitu ketika ada kondisi regangan bidang (*plane strain*). Ini terjadi ketika pelat memiliki ketebalan yang cukup besar. Namun jika deformasi dalam arah ketebalan dapat terjadi secara bebas (situasi *plane stress*) “faktor intensitas tegangan kritis” tergantung pada ketebalan pelat.

Intensitas tegangan untuk pelat tak terbatas (*infinite*) dengan jarak W antar retakan, dan panjang retak $2a$ pada pusatnya atau mengalami dua retakan kolinear, yang memanjang sebagaimana terlihat pada Gambar 2.37 diberikan penyelesaiannya oleh Westergaard, Irwin (1958), dan Koiter (1959) dengan persamaan (Broek, 1982):

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \sqrt{\left(\frac{W}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{W}\right)} \quad (2-98)$$



Gambar 2. 37 Pelat tak terbatas dengan retakan kolinier.

Sumber: (Broek, 1982)

Retak pada pelat dengan ukuran terbatas merupakan hal yang sangat menarik, namun tidak ada solusi dalam bentuk tertutup yang tersedia untuk kasus ini.

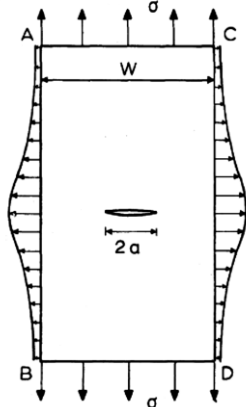
Permasalahan menjadi sulit karena adanya kondisi batas. Jika pelat dipotong sepanjang garis AB dan CD, maka bisa diperoleh potongan dengan lebar hingga w , yang berisi retak pusat $2a$. Dalam kasus retak-retak kolinear, garis selebar w menanggung tegangan (perhatikan bahwa tegangan geser nol karena simetri) di sepanjang tepi AB dan CD (gambar 2.38), sedangkan ujung-ujung plat yang berukuran terbatas adalah bebas dari tegangan.

Potongan dengan ukuran tertentu berperilaku sebagai pelat yang tidak terbatas jika retakannya kecil. Isida (1955) mengembangkan fungsi pemetaan untuk menurunkan faktor konsentrasi tegangan. Fungsi tersebut menurut Tada, Paris, & Irwin, (2000) dapat

digunakan untuk menghitung faktor intensitas tegangan untuk pelat hingga tingkat keakuratan yang sangat baik. Biasanya hasilnya disajikan sebagai:

$$K = Y \sigma \sqrt{a} \quad (2-99)$$

dengan Y adalah polynomial dalam a/w . Faktor $\sqrt{\pi}$ seringkali terkait juga dengan Y , namun kadang-kadang tidak.



Gambar 2. 38 Tegangan pada tepi potongan pelat tak terbatas dengan retak kolinier
Sumber: (Broek, 1982)

Feddersen (Broek, 1982) menemukan bahwa penyelesaian oleh Isida sangat mendekati perkiraan dengan rumus persamaan $\sqrt{\sec \pi a/W}$. Oleh karena itu persamaan yang sesuai untuk faktor intensitas tegangan untuk potongan pelat dalam kondisi tarik adalah:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \sqrt{\sec \pi a/W} \quad (2-100)$$

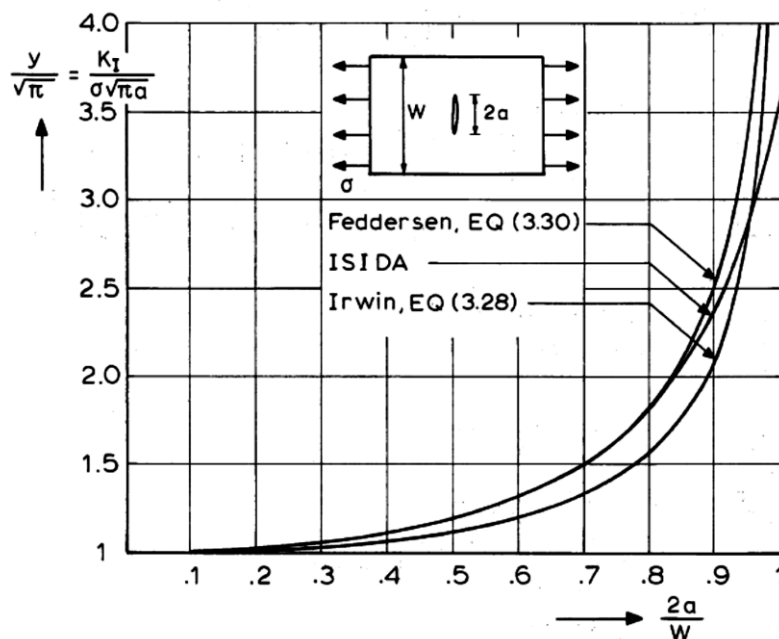
Perbandingan antara faktor koreksi lebar terbatas oleh Irwin, Isida dan Feddersen dapat dilihat pada gambar 2.39.

Potongan pelat dengan retakan kolinier (Gambar 2.37) sepanjang EF dan CD, serupa dengan potongan dengan retak di tepi. Analog dengan masalah retak terpusat, maka solusi dari persamaan 2.100 dapat digunakan sebagai aproksimasi atau pendekatan untuk retak tepi. Sekali lagi K direduksi menjadi $K = \sigma \sqrt{\pi a}$ untuk nilai a/W kecil. Namun, tekanan yang bekerja pada sisi EF cenderung untuk sedikit menutup retakan. Ketiadaan tekanan ini pada potongan ukuran terbatas menghasilkan pergeseran tepian retak yang lebih besar.

Akibatnya K agak lebih tinggi karena tepi bebas ini. Faktor koreksi adalah berkisar 12 persen (Tada et al., 2000). Jadi, untuk celah tepi kecil, K diberikan dalam bentuk:

$$K_I = 1,12 \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2-101)$$

Faktor intensitas tegangan dan persamaan polynomial order 4 untuk ukuran pelat terbatas untuk sejumlah konfigurasi praktis dapat dilihat pada Tabel 2.14.



Gambar 2. 39 Koreksi lebar terbatas untuk pelat dengan retakan di pusat.
Sumber: (Broek, 1982)

2. Faktor geometri

Faktor intensitas tegangan didefinisikan sebagai $K = \beta\sigma\sqrt{\pi a}$, di mana σ adalah tegangan nominal yang jauh dari retak. Faktor geometri β menyumbang fakta bahwa tekanan rata-rata di bagian retak lebih tinggi, juga untuk semua batas bebas mempengaruhi tegangan ujung retak seperti yang diungkapkan oleh K . Menentukan faktor geometri berarti derivasi fungsi $\beta(a/L)$ untuk rincian pembebanan dan geometri spesifik yang relevan dengan retak yang akan dianalisis. Cara di mana fungsi ini digunakan dalam pertumbuhan retak dan analisis fraktur tergantung pada definisi tegangan juga.

3. Analisis lebar retak pelat lentur murni

Konsep *Crack Opening Displacement* (COD) diperkenalkan untuk menangani masalah lebar retak pada bahan dengan ketangguhan tinggi. Seharusnya, perambatan retak dapat terjadi ketika bahan di ujung retak telah mencapai regangan plastik maksimum yang diizinkan. Regangan ujung retak dapat dikaitkan dengan pembukaan celah retak, yang merupakan kuantitas terukur. Ekstensi retak atau fraktur diasumsikan terjadi segera setelah *crack opening displacement* melebihi nilai kritis. Kriteria ini setara dengan kriteria K_{IC} dan G_{IC} pada kasus aplikasi LEFM (*Linear Elastic Fracture Mechanics*). COD kritis diutamakan

sebagai pembanding parameter ketangguhan untuk bahan berkekuatan rendah dengan ketangguhan tinggi (Broek, 1982).

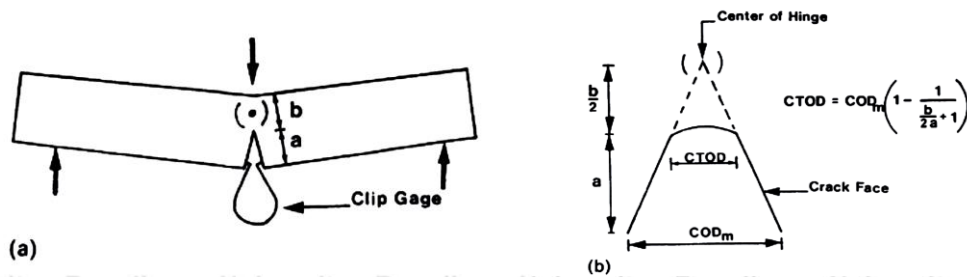
Faktor intensitas tegangan menggambarkan medan tegangan dan daerah plastik. Faktor intensitas tegangan yang sama akan memberikan medan tegangan yang sama dan daerah plastis yang sama. Kesamaan ini di ujung retak menuntut bahwa hal-hal yang sama terjadi sehingga faktor-faktor intensitas tegangan yang setara harus menyebabkan tingkat pertumbuhan yang sama. Fraktur terjadi ketika K melebihi nilai kritis, K_{Ic} .

Tabel 2. 14 Persamaan K untuk Faktor Geometri Praktis

	$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \left(\sec \frac{\pi a}{w} \right)^{\frac{1}{2}}$
	$K_I = 1,12 \sigma \sqrt{\pi a} \left(\frac{a}{w} \text{ kecil} \right) \text{ atau } K_I = Y \sigma \sqrt{a}$ dengan $Y = 1,99 - 0,41 \frac{a}{w} + 18,7 \left(\frac{a}{w} \right)^2 - 38,48 \left(\frac{a}{w} \right)^3 + 53,85 \left(\frac{a}{w} \right)^4$ $(1,99 = 1,12 \sqrt{\pi})$
	B = tebal balok $K_I = \frac{P s}{B w^{3/2}} \left[2,9 \left(\frac{a}{w} \right)^{1/2} - 4,6 \left(\frac{a}{w} \right)^{3/2} + 21,8 \left(\frac{a}{w} \right)^{5/2} - 37,6 \left(\frac{a}{w} \right)^{7/2} + 38,7 \left(\frac{a}{w} \right)^{9/2} \right]$
	B = Tebal spesimen $K_I = \frac{P}{B w^{1/2}} \left[29,6 \left(\frac{a}{w} \right)^{1/2} - 185,5 \left(\frac{a}{w} \right)^{3/2} + 655,7 \left(\frac{a}{w} \right)^{5/2} - 1017 \left(\frac{a}{w} \right)^{7/2} + 63,9 \left(\frac{a}{w} \right)^{9/2} \right]$

Sumber: (Broek, 1982)

Analisis lebar retak pada pelat HPFRC dilakukan dengan memperhitungkan lebar bukaan retak yang terjadi pada ujung retakan (CTOD), bukaan retak pada level tulangan (COD) dan bukaan retak pada sisi terluar pelat (COD_m) yang mengalami lentur sebagaimana terlihat pada Gambar 2.40.



Gambar 2. 40 Pengujian crack opening displacement: (a) spesimen COD; (b) Pengukuran COD_m and pendugaan CTOD.

Sumber: (Broek, 1989)

Lebar retak pada ujung retakan yang dihitung sebagai perpindahan bukaan ujung retak dihitung dengan persamaan $CTOD = \frac{4}{\pi} \frac{K^2}{E \sigma_{ys}}$.. Sementara itu pada level tulangan, bukaan retak dihitung dengan cara memasukkan nilai $x = 20$ mm ke dalam persamaan $COD =$

$$\frac{4\sigma}{E} \sqrt{(a + r_p^*)^2 - x^2} \quad \text{atau: } COD = \frac{4\sigma}{E} \sqrt{a^2 + \frac{E^2}{16\sigma^2} (CTOD)^2 - x^2} \quad . \quad \text{Bukaan retak}$$

maksimum dihitung dengan persamaan $COD_{max} = \frac{4\sigma}{E} \left[a + \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_{ys}^2} \right]$. pada kasus deformasi

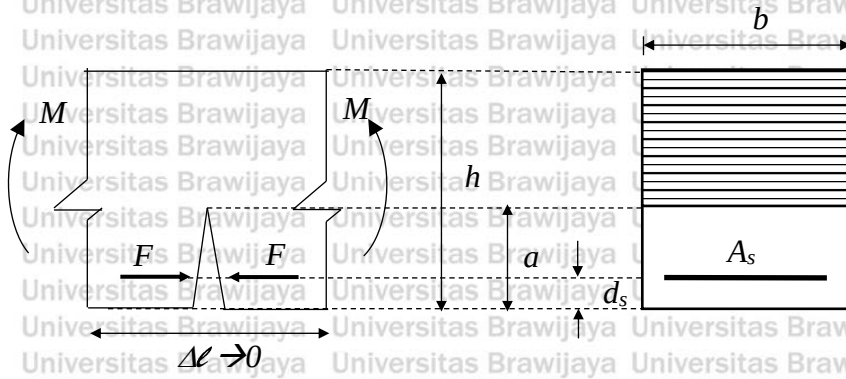
elastis maupun deformasi plastis COD proporsional dengan lebar retak dan ditulis dengan

$$\text{persamaan } COD = C_1 \frac{P}{E} a \quad \text{untuk kasus deformasi elastis atau } COD = C_1 \frac{P}{E} (a + r_p^*)$$

untuk kasus deformasi plastis (Broek, 1982). Untuk itu koefisien C_1 diperoleh dengan membandingkan bukaan retak hasil pengujian dengan nilai COD yang diperoleh dari hasil analisis. Nilai koefisien ini digunakan untuk menyusun persamaan lebar retak w_{maks} .

4. Analisis lebar retak akibat reaksi tulangan dan momen lentur

Dalam rangka menganalisis perilaku struktur yang memiliki retakan pada elemen strukturnya, sangat perlu untuk mengetahui mengenai hubungan antara beban dan deformasi pada elemen tersebut. Ketika elemen yang retak mendapatkan penambahan beban secara simultan dan masih dapat dianggap sebagai berperilaku elastis, maka pengaruh penggabungan gaya dalam dan momen terhadap deformasi juga harus dipertimbangkan.



Gambar 2. 41 Elemen retak
Sumber: (Carpinteri, 1986)

Jika ditinjau suatu elemen retak seperti terlihat pada gambar 2.41, yang secara simultan menahan momen lentur M dan gaya aksial eksentris F . Momen lentur M^* menginduksi faktor intensitas tegangan pada ujung retak yang sama dengan (Carpinteri, 1986):

$$K_I = \frac{M^*}{h^{3/2}b} Y_M(\xi) \quad (2-102)$$

dengan $\xi = a/h$ adalah kedalaman retak relatif dan Y_M adalah fungsi:

$$Y_M(\xi) = 6x \left[1,99 \xi^{1/2} - 2,47 \xi^{3/2} + 12,97 \xi^{5/2} - 23,17 \xi^{7/2} + 24,80 \xi^{9/2} \right] \quad (2-103)$$

Untuk $0 \leq \xi \leq 0,7$. Dengan cara yang sama, gaya aksial F^* dapat dikaitkan dengan faktor intensitas tegangan:

$$K_I = \frac{F^*}{h^{1/2}b} Y_F(\xi) \quad (2-104)$$

Dengan:

$$Y_F(\xi) = \left[1,99 \xi^{1/2} - 0,41 \xi^{3/2} + 18,70 \xi^{5/2} - 38,48 \xi^{7/2} + 53,85 \xi^{9/2} \right] \quad (2-105)$$

Untuk $0 \leq \xi \leq 0,7$. Momen lentur M^* menghasilkan rotasi lokal

$$\varphi = \lambda_{MM} M^* \quad (2-106)$$

Dengan

$$\lambda_{MM} = \frac{2}{bh^2E} \int_0^\xi Y_M^2(\xi) d\xi \quad (2-107)$$

Gaya tarik aksial F^* menghasilkan rotasi:

$$\varphi = \lambda_{MF} F^* \quad (2-108)$$

Dengan

$$\lambda_{MF} = \frac{2}{bhE} \int_0^\xi Y_M(\xi) Y_F(\xi) d\xi \quad (2-109)$$

Penampang tidak retak bekerja sebagai sambungan kaku, sedangkan penampang retak merupakan sambungan elastis yang berotasi akibat aksi momen lentur M^* dan gaya aksial

F^* , sehingga:

$$\varphi = \lambda_{MM} M^* + \lambda_{MF} F^* \quad (2-110)$$

Untuk sistem statis tak tertentu, total momen adalah:

$$M^* = M - F \left(\frac{b}{2} - h \right) \quad (2-111)$$

dan gaya aksial adalah:

$$F^* = -F \quad (2-112)$$

Perpindahan bukaan retak (COD) $\Delta\delta_{FF}$ yang dihasilkan oleh gaya F pada titik dimana gaya F^* bekerja dan deformasi bukaan retak (COD) $\Delta\delta_{FM}$, yang disebabkan oleh momen lentur M^* ditulis (Carpinteri, 1986):

$$\delta = \lambda_{FM} M^* + \lambda_{FF} F^* \quad (2-113)$$

dengan λ_{MM} , λ_{FM} , λ_{MF} , dan λ_{FF} adalah compliance dari elemen akibat adanya retakan, dengan

$$\lambda_{FM} = \frac{2}{b h E} \int_0^\xi Y_F(\xi) Y_M(\xi) d\xi \quad (2-114)$$

$$\lambda_{FF} = \frac{2}{b E} \int_0^\xi Y_F^2(\xi) d\xi \quad (2-115)$$

2.6.3 Prediksi lebar retak menurut peraturan (*codes provisions*)

Dalam (ACI 224.2R-92, 1997) lebar retak maksimum = jarak retak maksimum pada tegangan baja tertinggi (4 kali penutup beton) x rerata regangan tulangan. Pada elemen tarik yang batang tulangannya lebih dari satu, digunakan selimut beton efektif t_e yang didefinisikan sebagai fungsi jarak tulangan, yaitu tebal selimut beton yang diukur hingga pusat tulangan. Semakin besar jarak tulangan, lebar retak yang terbentuk akan semakin besar. Sejak 1995, persyaratan kontrol retak lentur dalam ACI didasarkan pada metode faktor-z yang dikembangkan oleh Gergely & Lutz. Persamaan yang diusulkan pada versi awal ACI 318-95 memiliki bentuk:

$$w_{max} = 0,011 \cdot 10^{-3} \beta f_s \sqrt[3]{d_c A_0} \text{ (mm)} \quad (2-116)$$

Dengan $\beta = \frac{h-x}{d-x}$ adalah perbandingan antara jarak antara sumbu netral dan permukaan tarik ekstrim ($h-x$) terhadap jarak antara sumbu netral dan pusat baja tulangan ($d-x$). x = jarak sumbu netral ke serat tekan terluar. Untuk balok digunakan nilai $\beta = 1,20$. A_0 = luas beton disekitar batang tulangan tunggal = A_e/n_b . A_e = luas efektif beton tarik. A_e dapat didefinisikan sebagai luasan balok beton dengan lebar sepenuhnya dan pusat tulangan utama yang sama, $A_e = 2 d_c b$. Sedangkan n_b adalah jumlah tulangan tarik. Selanjutnya d_c = jarak dari pusat batang tarik menuju serat tarik terluar.

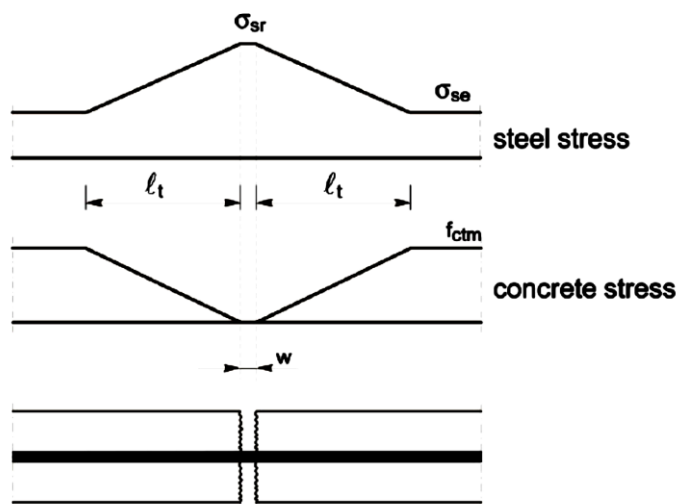
Lebar retak lentur dinyatakan dalam persamaan di atas dengan $\frac{h-x}{d-x} = 1,2$, dan dinyatakan dalam bentuk

$$z = f_s \sqrt[3]{d_c A_0} \quad (2-117)$$

(ACI 318-99, 1999), (ACI 318-02, 2002), serta (ACI 318-11, 2011) yang diacu menjadi (SNI 2847:2013, 2013) dan (ACI 318M-14, 2014) menyatakan bahwa tulangan tarik lentur harus didistribusikan dengan baik dalam daerah tarik lentur maksimum dari suatu penampang komponen struktur. Spasi tulangan terdekat ke muka tarik, s , tidak boleh melebihi yang diberikan oleh.

$$s = 380 \left(\frac{280}{f_s} \right) - 2,5 c_c \leq 300 (280/f_s) \quad (2-118)$$

dengan c_c adalah jarak terkecil dari permukaan tulangan atau baja prategang ke muka tarik. Jika terdapat hanya satu batang tulangan atau kawat yang terdekat ke muka tarik sejauh, s , yang dipakai adalah lebar muka tarik yang terjauh. Tegangan baja tulangan f_s yang dihitung yang terdekat ke muka tarik pada saat beban layan harus dihitung berdasarkan pada momen tak terfaktor. Tegangan baja tulangan f_s boleh diambil sebesar $2/3 f_y$.



Gambar 2. 42 Definisi lebar retak
Sumber: (Eurocode 2, 2014)

Dalam Eurocode 2 (2014) disebutkan bahwa lebar retak adalah perbedaan antara perpanjangan beton dan baja yang melebihi panjang ($2l_t$) dengan l_t adalah panjang transmisi yang diperlukan untuk meningkatkan kekuatan beton dari 0 hingga kekuatan tarik f_{ctm} (Gambar 2.42). Jarak maksimum antara dua retakan harus $2l_t$, jika tidak maka retakan baru akan terjadi di antaranya. Dapat didemonstrasikan bahwa panjang transmisi l_t adalah:

$$l_t = \frac{1}{4} \frac{f_{ctm} \theta}{\tau_{bm} \rho} \quad (2-119)$$

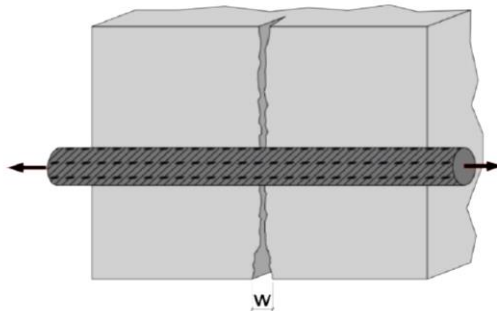
Untuk perhitungan lebar retak maksimum atau lebar retak karakteristik (Gambar 2.43), perbedaan antara perpanjangan beton dan baja harus dihitung untuk jarak retak terbesar $s_{r,max} = 2 l_t$. Persamaan untuk kontrol lebar retak elemen lentur adalah

$$w_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (2-120)$$

dengan w_k = lebar retak maksimum (mm), $s_{r,max}$ = jarak retak maksimum, dan $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$ = perbedaan deformasi antara beton dan baja akibat jarak retak maksimum.

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{f_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1+n \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{f_s}{E_s} \quad (2-121)$$

Dengan f_s = asumsi tegangan baja pada penampang retak, n = modulus rasio E_s/E_{cm} , dan $\rho_{p,eff} = \frac{(A_s + n A_p)}{A_p}$, k_t = faktor yang tergantung pada durasi beban (0,6 untuk beban jangka pendek dan 0,4 untuk jangka panjang).

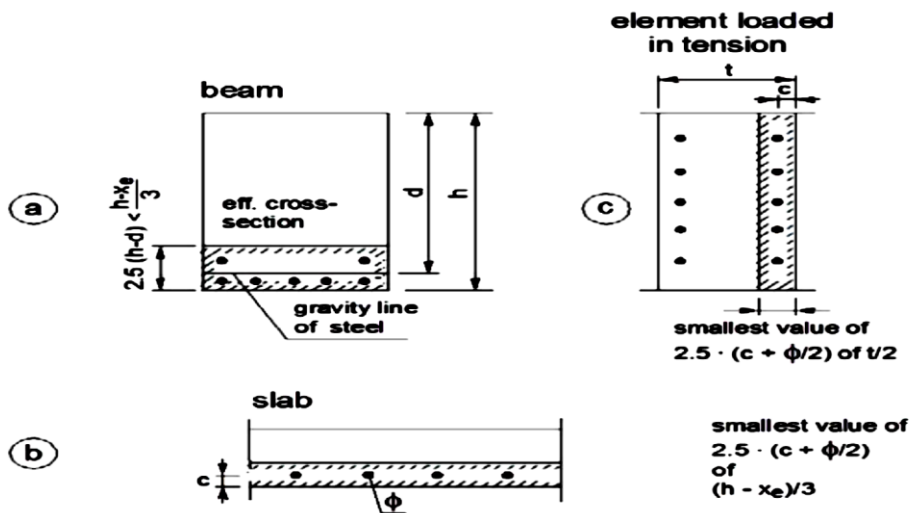


Gambar 2. 43 Pengukuran lebar retak w
Sumber: (Eurocode 2, 2014)

$s_{r,max}$ = jarak retak maksimum, mm dan diberikan oleh persamaan

$$s_{r,max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 \phi / \rho_{p,eff} \quad (2-122)$$

dengan c = selimut bersih beton, ϕ = diameter batang (mm), K_1 = faktor lekatan (0,8 untuk batang tulangan mutu tinggi, dan 1,6 untuk batang tulangan polos), k_2 = koefisien distribusi regangan (1,0 untuk tarik dan 0,5 untuk lentur). k_3 direkomendasikan 3,4 dan k_4 direkomendasikan 0,425. Untuk mengaplikasikan rumusan lebar retak, pada dasarnya terdapat pada bagian beton tarik, pada struktur akibat lentur. Oleh karena itu dibutuhkan ketinggian bidang tarik efektif $h_{c,ef}$ yang merupakan nilai minimum dari 2,5 $(h-d)$ atau $(h-x)/3$ atau $h/2$ (Gambar 2.44).



a) Balok, b) Pelat, c) Elemen dalam tarik lentur

Gambar 2. 44 Ketinggian batang tarik efektif menurut Eurocode 2

Sumber: (Eurocode 2, 2014)

Egyptian code (ECP 203-2007, 2007) memberikan lebar retak dengan persamaan:

$$w_k = \beta \varepsilon_{sm} s_{rm} \quad (2-123)$$

Dengan w_k = koefisien kondisi lebar retak (mm); s_{rm} = rata-rata jarak retak (mm); ε_{sm} = regangan baja rata-rata; β = koefisien lebar retak rata-rata: $\beta = 1,7$ untuk lebar atau tebal < 800 mm, dan $\beta = 1,3$ untuk lebar atau tebal < 300 mm.

Regangan baja rata-rata ε_{sm} diberikan oleh persamaan:

$$\varepsilon_{sm} = \frac{f_s}{E_s} \left(1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{f_{scr2}}{f_s} \right)^2 \right) \quad (2-124)$$

Dengan f_s = tegangan tulangan tarik dihitung berdasar penampang retak (N/mm^2); f_{scr2} = tegangan dalam tulangan longitudinal tarik akibat kondisi pembebanan yang menyebabkan retak pertama (N/mm^2); β_1 = koefisien yang dihitung untuk durasi beban; 1,0 untuk pembebanan jangka pendek tunggal dan 0,5 untuk pembebanan siklik atau jangka panjang; E_s = Modulus elastisitas tulangan (N/mm^2). Nilai tengah jarak retak rata-rata adalah:

$$s_{rm} = 50 + 0,25 k_1 k_2 \phi / \rho_{eff} \quad (2-125)$$

Persamaan di atas serupa dengan persamaan dalam Eurocode 2 dengan asumsi bahwa selimut beton bersih sama dengan 25 mm.

Menurut BS 8110-1:1997 (1999), lebar retak lentur pada titik tertentu permukaan elemen tergantung terutama pada tiga faktor: 1) Kedekatan titik yang ditinjau pada batang tulangan tegak lurus retakan atau selimut beton; 2) Kedekatan sumbu netral pada titik yang ditinjau atau $(h-x)$; 3) Regangan permukaan rata-rata pada point yang ditinjau. BS 8110-

1:1997 (1999) merekomendasikan bahwa regangan dalam tulangan tarik dibatasi $0,8 f_y/E_s$ (dalam hal ini $0,8 \times$ regangan leleh baja). Retak tidak boleh merusak penampilan. Elemen yang terekspos, lebar retak maksimum tidak melebihi 0,30 mm. Juga, retak tidak boleh menyebabkan korosi baja. Ketentuan BS 8110-1:1997 (1999) didasarkan pada persamaan empirik (Beeby, 1979). Lebar retak permukaan rencana

$$w_D = \frac{3 * a_{cr} * \varepsilon_m}{1 + 2 \left(\frac{a_{cr} - c_{min}}{h - x} \right)} \quad (2-126)$$

dengan a_{cr} = jarak dari titik tinjau terhadap permukaan tulangan longitudinal terdekat; ε_m = regangan rata-rata pada level retak ditinjau; c_{min} = selimut minimum dari baja tarik; h = ketebalan total elemen; x = ketebalan sumbu netral.

Untuk penampang retak, nilai ε_m dinyatakan sebagai:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_1 - \frac{b(h-x)(a'-x)}{3 E_s A_s (d-x)} \quad (2-127)$$

dengan ε_1 = regangan pada level yang ditinjau, dihitung dengan mengabaikan efek pengganggu beton dalam daerah tarik, b = lebar penampang pada pusat baja tarik, a' = jarak dari permukaan tekan ke titik dimana lebar retak akan dihitung. Dalam menghitung regangan, modulus elastisitas beton harus diambil setengah nilai sesaat (BS 8110-1:1997, 1999).

CEB/FIP Model Code 1990 mempertimbangkan mekanisme transfer tegangan antara beton dan tulangan untuk memperkirakan jarak dan lebar retak (CEB-FIP, 1993). Sebelum retak, beban tarik bekerja pada balok menyebabkan regangan yang sama dalam beton dan baja. Regangan meningkat dengan meningkatnya beban hingga kapasitas regangan dalam beton tercapai, dimana titik retak berkembang dalam beton. Pada lokasi retak, beban tarik yang bekerja ditahan sepenuhnya oleh baja. Dekat dengan retakan, terdapat *slip* antara beton dan baja, dan *slip* ini adalah faktor fundamental untuk mengontrol lebar retak. *Slip* menyebabkan perpindahan sebagian kekuatan dari baja ke beton dengan cara tegangan permukaan (*bond-stress*) yang bekerja pada perimeter tulangan. Oleh karena itu, beton di antara retakan berpartisipasi dalam menahan gaya tarik. Mekanisme *bond-slip* menyebabkan regangan pada beton dan baja memiliki variasi periodik sepanjang bentang elemen. Pada retakan, regangan baja maksimum dan regangan beton nol. Di antara retakan, regangan baja minimum dan regangan beton maksimum.

Dalam pendekatan CEB/FIP, lebar retak terkait dengan jarak dimana *slip* terjadi dan pada perbedaan antara regangan baja dan beton dalam daerah *slip* pada kedua sisi retakan.

Hubungan mendasar untuk menghitung lebar retak karakteristik adalah:

$$w_k = l_{s,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs}) \quad (2-128)$$

dengan w_k = lebar retak karakteristik; $l_{s,max}$ = jarak maksimum dimana *slip* antara beton dan baja terjadi; ε_{sm} = rata-rata regangan baja sepanjang $l_{s,max}$; ε_{cs} = regangan susut beton (dapat memiliki nilai negatif).

Rumusan pendekatan untuk $l_{s,max}$ adalah

$$l_{s,max} = \frac{\phi}{3,6 \rho_{s,ef}} \quad (3.4) \quad (2-129)$$

dengan ϕ = diameter tulangan; $\rho_{s,ef}$ luas baja dibagi luas efektif beton dalam daerah tarik.

Persamaan (2-108) didasarkan pada jarak dari bidang retak yang diperlukan tegangan beton membangun tegangan tarik beton karena *bond-stress*. *Bond-stress* diasumsikan seragam sepanjang jarak slip dan sama dengan 1,8 kali kuat tarik beton, f_t .

NZS 3101 (2006) menyatakan kontrol lebar retak tidak diperlukan apabila tegangan tarik longitudinal maksimum $\leq 0,4 \sqrt{f'_c}$. Lebar retak rencana dapat dihitung dengan persamaan

$$w = 2,0 \left(\frac{y-kd}{d-kd} \right) \frac{f_s}{E_s} \left(\sqrt{(s/2)^2 + c_m^2} \right) \quad (2-130)$$

Dengan f_s/E_s = regangan pada level penulangan, kd = kedalaman sumbu netral, y = jarak dari serat tekan ekstrim ke serat yang diperiksa, c_m = jarak selimut beton dari pusat tulangan ke permukaan beton, s = jarak antar tulangan.

Hongkong code of practice for structural use of concrete atau CoP SUC-2013 (The Building Departement (BD), 2013) menyatakan retak adalah fenomena random dan lebar retak maksimum absolut tidak dapat diprediksi. Regangan pada tulangan tarik dibatasi oleh nilai $0,8 f_y/E_s$. Lebar retak permukaan rencana dihitung dengan persamaan:

$$w = \frac{3 a_{cr} \varepsilon_m}{1 + 2 \left(\frac{a_{cr} - c_{min}}{h - x} \right)} \quad (2-131)$$

dengan a_{cr} = jarak dari titik yang ditinjau ke permukaan tulangan memanjang terdekat, c_{min} = selimut minimum batang tarik, ε_m regangan rata-rata pada level retak yang ditinjau, dengan persamaan

$$\varepsilon_m = \varepsilon_1 - \frac{b_t(h-x)(a'-x)}{3 E_s A_s (d-x)} \quad (2-132)$$

ε_1 = regangan pada level yang ditinjau dengan mengabaikan pengaruh kekakuan beton pada daerah tarik, a' = jarak dari permukaan tekan ke titik dimana lebar retak akan dihitung, b_t = lebar penampang pada pusat baja tarik.

Tabel 2. 15 Rumusan Lebar Retak Beberapa Peraturan Beton

No.	Peraturan	Rumusan
1	(ACI 224.2R-92, 1997)	$w_{max} = 0,011 \cdot 10^{-3} f_s^3 \sqrt{d_c A}$
2	(ACI 318M-14, 2014) dan (SNI 2847:2013, 2013)	$w_{max} = 0,011 \cdot 10^{-3} \beta f_s^3 \sqrt{d_c A_0}$; $A_0 = A_e/n_b$.
3	(Eurocode 2, 2014)	$w_k = \left(f_s - K_t \left(\frac{f_{cteff} (1 + n \rho_{eff})}{\rho_{eff}} \right) \right) \frac{\phi}{E_s}$ $= \left(3,4c + 0,425 k_1 k_2 \frac{\phi}{\rho_{eff}} \right) \frac{\phi}{E_s}$
4	Egyptian code (ECP 203-2007, 2007)	$w_k = \beta \left\{ \frac{f_s}{E_s} \left(1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{f_{scr2}}{f_s} \right)^2 \right) \right\} \{ 50 + 0,25 k_1 k_2 \phi / \rho_{eff} \}$
5	(BS 8110-1:1997, 1999)	$w_D = \frac{3 * a_{cr} * \left(\varepsilon_1 - \frac{b(h-x)(a'-x)}{3 E_s A_s (d-x)} \right)}{1 + 2 \left(\frac{a_{cr} - c_{min}}{h-x} \right)}$
6	(CEB-FIP, 1993)	$w_k = \frac{\phi}{3,6 \rho_{s,ef}} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} - \varepsilon_{cs})$
7	(NZS 3101, 2006)	$w = 2,0 \left(\frac{y-kd}{d-kd} \right) \frac{f_s}{E_s} (\sqrt{(s/2)^2 + c_m^2})$
8	CoP SUC-(2013)	$w = \frac{3 * a_{cr} * \left(\varepsilon_1 - \frac{b_t(h-x)(a'-x)}{3 E_s A_s (d-x)} \right)}{1 + 2 \left(\frac{a_{cr} - c_{min}}{h-x} \right)}$

Dalam persamaan pada Tabel 2.15 tersebut yang berperan sebagai pembilang adalah parameter $f_s, \phi, c_e, \varepsilon_{sm}, \varepsilon_{cm}, \varepsilon_{cs}, A_e, d_c, a_{cr}, \beta$ sedangkan yang berperan sebagai penyebut atau pembagi adalah parameter E_s, ρ_{te}, A_s , dengan f_s = tegangan dalam batang baja (MPa), ϕ = diameter batang tulangan (mm), c_e = tebal selimut beton efektif, ε_{sm} = regangan baja rata-rata, ε_{cm} = regangan beton rata-rata. ε_{cs} = regangan susut beton, a_{cr} = jarak dari permukaan tulangan ke titik dimana lebar retak dihitung. A_e = luasan beton tertarik efektif (mm²), d_c = jarak yang diukur dari pusat baja tarik ke arah tegangan tarik maksimum, $\beta = \frac{h-x}{d-x}$ = perbandingan jarak antara sumbu netral dan permukaan tegangan tarik ekstrim terhadap jarak antara sumbu netral dan pusat baja tulangan. Dari persamaan-persamaan tersebut terlihat bahwa terdapat dua kelompok penentuan lebar retak. Untuk peraturan di negara yang mengacu pada ketentuan peraturan di Amerika, lebih banyak yang mengabaikan pengaruh kuat tarik atau regangan beton, sedangkan beberapa negara yang mengacu pada peraturan *Eurocode* atau *British Standard*, tetap mempertimbangkan pengaruh beton, seperti Inggris, Eropa, India, New Zealand, dan Hongkong.

2.6.4 Faktor-faktor yang mempengaruhi lebar retak

Beberapa peneliti mencoba meneliti penggunaan rumusan-rumusan jarak retak dan lebar retak dalam rangka mencari faktor-faktor yang benar-benar berpengaruh pada jarak dan lebar retak. Piyasena meneliti tentang jarak dan lebar retak pelat beton yang dipengaruhi oleh beberapa variabel yang berbeda. Diameter batang, lebar efektif elemen untuk setiap batang, dan selimut beton merupakan variabel yang paling menentukan jarak dan lebar retak pada tingkat beban yang diberikan. Dari analisis dan aproksimasi yang dilakukan terhadap dua buah blok beton yang dikenai pola tegangan eksternal yang serupa, didapat penjelasan terhadap beberapa variabel sebagai berikut (Piyasena, 2002) :

1. Pengaruh kuat tekan beton f_c' . Kekuatan beton tidak memberikan efek signifikan pada jarak dan lebar retak jika variabel lainnya tetap konstan. Jarak retak kritis dan lebar retak tidak berpengaruh jika tebal efektif $d > 300$ mm.
2. Pengaruh lebar penampang, b dan jumlah tulangan m .
3. Pengaruh selimut beton, c . Apabila selimut beton ditingkatkan saat variabel yang lain tidak berubah, maka lebar retak dan jarak retakan akan meningkat.
4. Pengaruh diameter tulangan ϕ . Tidak terdapat perubahan yang signifikan pada lebar retak ketika diameter tulangan bervariasi saat semua variabel lainnya konstan.

(Allam, Shoukry, Rashad, & Hassan, 2012) melakukan evaluasi terhadap beberapa persamaan lebar retak elemen lentur beton bertulang dalam peraturan bangunan (*Egyptian code 2007*, *Eurocode2-2001*, *BS 8110-97*, dan *ACI 318-95*) dan persamaan para peneliti (Gergely & Lutz, Oh & Kang, Frosch). Dari penelitiannya terhadap variabel seperti penutup beton, tegangan baja, rasio tulangan lentur, permukaan tulangan, dan pengaturan tulangan, didapat:

1. Dengan meningkatnya rasio tulangan μ , kontribusi beton dalam tegangan tarik menurun, regangan baja rata-rata meningkat, akibatnya lebar retak meningkat.
2. Pendetailan tulangan merupakan faktor penting yang mempengaruhi lebar retak.
3. Ketika ikatan antara beton dan baja meningkat, lebih banyak gaya tarik ditransfer ke beton di antara retakan, sehingga terjadi penurunan *slip*, karenanya terjadi pengurangan jumlah pemanjangan ($\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$) dan menghasilkan pengurangan lebar retak.

Carino & Clifton (1995) menyatakan bahwa elemen balok atau pelat yang dikenai momen lentur akan mengalami retak lentur saat tegangan dalam daerah tarik melebihi kekuatan lentur beton. Retak akan memanjang dari permukaan tarik ke lokasi sumbu netral

penampang melintang. Berbagai badan teknis telah merekomendasikan lebar retak ditoleransi untuk kondisi yang berbeda. Beberapa rekomendasi terlihat pada Tabel 2.16.

Tabel 2. 16 Toleransi Lebar Retak

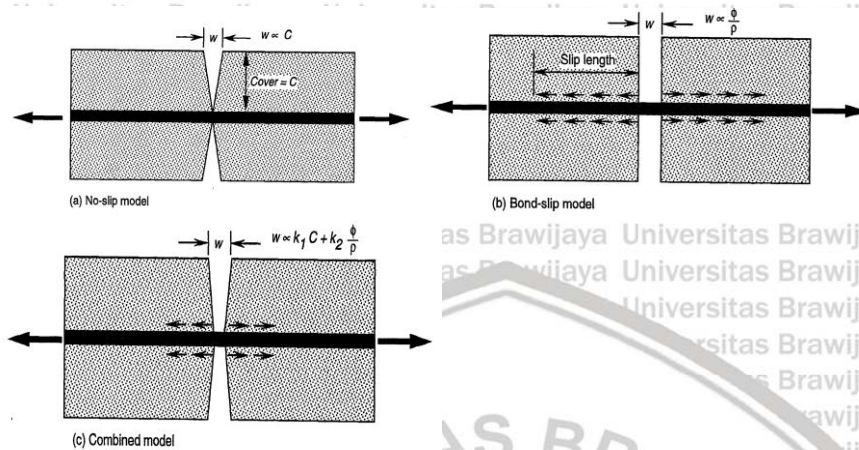
Kondisi terekspos	Lebar retak yang dapat diterima
ACI 224R-90	
udara kering atau membran pelindung	0,41
Kelembaban, udara lembab, tanah	0,30
bahan kimia <i>deicing</i>	0,18
Air laut dan air laut <i>spray</i> ; pembasahan dan pengeringan	0,25
struktur penahan air	0,10
ACI 318-89	
Interior	0,41
Exterior	0,33
ACI 350R-89	
Normal*	0,27
Parah	0,22
CEB/FIP Model Code 1990	
lingkungan yang lembab, <i>agent deicing</i> , air laut	0,30
*paparan sanitasi yang normal didefinisikan sebagai retensi cairan (kedap) bila terkena cairan dengan pH > 5 atau terkena solusi sulfat kurang dari 1500 ppm. Sumber: (Carino & Clifton, 1995)	

Dalam elemen lentur, lokasi sumbu netral merupakan faktor yang berkontribusi pada lebar retak permukaan (Beeby, 1979). Karena bagian datar tetap datar, lebar dari retak lentur meningkat sesuai dengan jaraknya dari sumbu netral. Rao, Pandurangan, Sultana, & Eligehausen (2007) menyatakan bahwa diameter tulangan konvensional tidak cukup signifikan memberikan pengaruh pada sifat tegangan lekat beton mutu tinggi. Dengan pengujian metode *pullout test*, Bae, Choi, & Choi (2016) menyatakan tegangan lekat meningkat sesuai dengan meningkatnya selimut beton. Serat baja meningkatkan tegangan lekat beton dan peningkatannya proporsional dengan meningkatnya kuat tarik. Borosnyói & Snóbli (2010) meneliti tentang variasi lebar retak terkait dengan variasi ketebalan selimut beton untuk spesimen dengan tulangan tunggal yang diletakkan secara eksentrik pada benda uji balok. Lebar retak permukaan tergantung pada tebal penutup beton, namun lebar retak mikro sekunder pada level baja tulangan tidak tergantung pada tebal selimut beton. Retak-mikro sekunder merupakan bidang deformasi yang muncul di sekitar baja tulangan dan mempengaruhi lebar retak struktural makroskopik.

(CEB-FIP, 1993) mengasumsikan bahwa lebar retak dipicu oleh slip relatif antara beton dan baja (Gambar 2.45). Ada juga pendapat bahwa lebar retak permukaan dipengaruhi oleh pelepasan regangan beton di sekitar tulangan. Lebar retak sebenarnya lebih mendekati kombinasi dari dua mekanisme tersebut, dan beberapa peraturan perencanaan mengestimasi lebar retak rata-rata (Beeby, 1979):

$$w_m = \left(K_1 c + K_2 \frac{\phi}{\rho} \right) \varepsilon_m \quad (2-133)$$

dimana w_m = lebar retak rata-rata; c = selimut beton; K_1, K_2 = konstanta empirik; ϕ = diameter tulangan; ρ = rasio tulangan; dan ε_m = regangan rata-rata pada level retak ditinjau.



Gambar 2. 45 Perbandingan model lebar retak

Sumber: (Carino & Clifton, 1995)

BAB III

KERANGKA KONSEP PENELITIAN

3.1 Kerangka Pikir

Penelitian yang dilakukan pada beton kinerja tinggi mayoritas menggunakan Semen Portland jenis I, namun pada kenyataannya jenis Semen Portland jenis I tidak lagi beredar di pasaran. Jenis semen yang banyak beredar saat ini adalah dari Semen Portland Pozolan. Oleh karena itu diperlukan penyesuaian terhadap proporsi bahan yang digunakan dalam perencanaan campuran beton kinerja tinggi, agar hasil yang diperoleh memenuhi kriteria kuat tekan beton mutu tinggi (*high-strength concrete*) dan kriteria beton serat kinerja tinggi (*high-performance fiber-reinforced concrete*) lainnya. Setiap komponen bahan penyusun beton memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap kinerja bahan beton kinerja tinggi. Ketelitian hasil uji pemeriksaan sifat bahan penyusun sangat menentukan dalam menyusun rencana campuran (*mix design*) beton serat kinerja tinggi.

Beton serat kinerja tinggi dapat ditingkatkan kinerjanya melalui perbaikan pada tingkat mikrostruktur pasta semen terhidrasi, melalui tiga parameter yaitu: pengendalian porositas, penurunan ukuran butir, dan pengendalian ketidakhomogenan. Silika fume bekerja sebagai mikrofiller pada beton kinerja tinggi. Keberadaan silika fume dalam beton segar berfungsi mengurangi *bleeding* dan memperbesar sifat kohesif. Silika fume juga bereaksi dengan kalsium hidroksida, yang akan meningkatkan kekuatan akhir.

Peningkatan kinerja dalam menahan beban layan dapat dilakukan melalui penataan proporsi serat sesuai kebutuhan elemen struktur. Serat yang sangat kecil dan tersebar dengan baik dapat mengontrol retakan mikro awal pada matriks beton serat kinerja tinggi dan menghasilkan deformabilitas yang sangat tinggi. Ditinjau dari perilaku lenturnya, beton serat kinerja tinggi akan berperilaku linier pada kondisi elastis hingga terjadinya retakan awal pada beton akibat tegangan tarik. Sesudah itu beton serat kinerja tinggi akan berperilaku nonlinier karena beban yang bekerja meningkat. Hal ini sejalan dengan berkurangnya kuat tarik beton akibat perkembangan retak. Tegangan tarik yang bekerja akan ditahan oleh kuat tarik baja tulangan, serta lekatan beton dan baja tulangan.

Pada elemen struktur pelat satu arah atau balok, beban yang bekerja pada beton serat kinerja tinggi akan didistribusikan sebagai tegangan tarik lentur (f_t) dibawah garis netral pelat dan tegangan tekan lentur (f_c) di atas garis netral pelat. Tegangan tarik lentur (f_t) yang bekerja akan ditahan oleh kuat tarik lentur beton (f_{it}) yang diperkuat oleh tegangan tarik serat (f_{ft}) hingga mencapai nilai *modulus of rupture* (f_r), dan kuat tarik baja tulangan (f_{st}) dengan penyaluran melalui tegangan lekat (u) antara beton dan baja tulangan. Tegangan tekan lentur (f_c) akan ditahan oleh kuat tekan beton (f'_c).

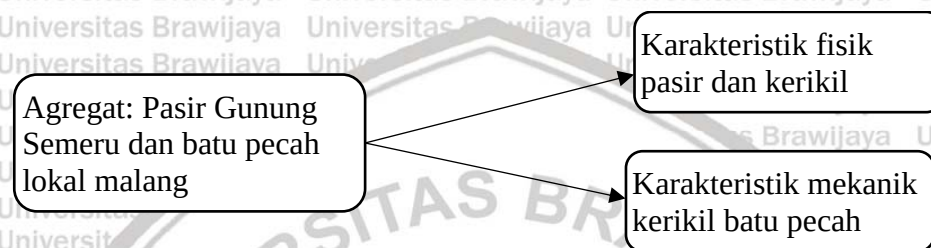
Penggunaan silika fume dan serat dengan proporsi yang optimal diharapkan dapat meningkatkan kinerja beton serat kinerja tinggi pada pelat satu arah. Peningkatan kinerja ini dapat dilihat dari efektifitas bekerjanya masing-masing variabel kuat tarik lentur beton (f_{it}), tegangan tarik serat (f_{ft}), *modulus of rupture* (f_r), tegangan lekat (u) antara beton dan baja tulangan, dan kuat tarik baja tulangan (f_{st}) dalam menahan gaya atau tegangan yang bekerja. Dalam hal ini diperlukan penggambaran hubungan antara variabel tersebut dengan besaran defleksi lentur maksimum yang terjadi berdasar hasil eksperimen.

Terdapat tiga faktor utama yang berkontribusi pada lebar retak permukaan dalam balok beton bertulang: (1) Pelepasan regangan di beton yang retak; (2) *Slip* relatif antara beton dan baja; dan (3) Jarak dari sumbu netral. Lebar retak terkait dengan jarak terjadinya *slip* dan pada perbedaan antara regangan baja dan beton dalam zona *slip* pada kedua sisi retakan. Penambahan serat pada matrik beton akan mempengaruhi kuat tarik beton serat kinerja tinggi f_t , sedangkan kuat tekan beton f'_c akan mempengaruhi kuat lekat beton serat kinerja tinggi u . Kuat tarik f_t dan kuat lekat beton serat kinerja tinggi akan memberikan efek pada proses terjadinya retak pada pelat beton serat kinerja tinggi. Kondisi tersebut perlu dijabarkan dalam bentuk persamaan empiris untuk memprediksi lebar retak, khususnya pada pelat beton serat kinerja tinggi, dengan mempertimbangkan berbagai variabel yang menjadi parameter perilaku tarik lentur dan parameter perilaku lekatan antara beton dan baja tulangan.

3.2 Model Konseptual

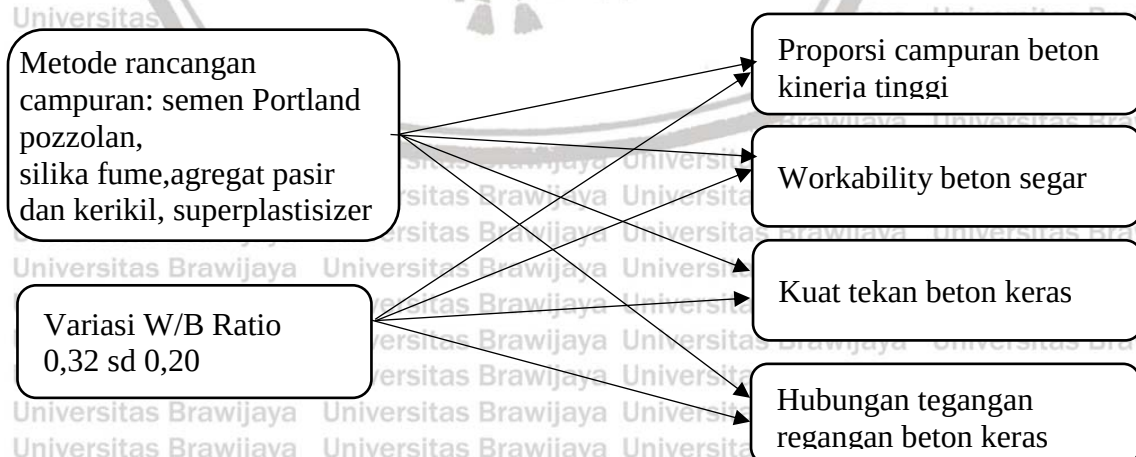
Jenis batuan sebagai bahan agregat penyusun beton kinerja tinggi sangat mempengaruhi karakteristik kimia, mineralogi, petrografi dan karakteristik fisik agregat tersebut. Dalam penelitian ini deskripsi petrografi, komposisi kimia, dan mineralogi tidak dipertimbangkan. Hanya karakteristik fisik dan mekanik saja yang dijadikan sebagai bahan pertimbangan utama kesesuaian agregat untuk memperoleh beton kinerja tinggi.

Pada beton kinerja tinggi, pasta semen terhidrasi dan zona transisi dapat dibuat begitu kuat, sehingga jika agregat kasar tidak cukup kuat, akan menjadi *link* terlemah dalam beton. Dengan demikian, penggunaan agregat lokal dalam proses pembuatan campuran beton serat kinerja tinggi juga memerlukan pemeriksaan tingkat keausannya untuk mengetahui karakteristik mekanik agregat kasar. Penelitian disertasi tahap I ini meliputi penelitian sifat fisik bahan agregat pasir yang berasal dari aliran sungai yang berinduk pada Gunung Semeru dan sifat fisik serta sifat mekanik kerikil batu pecah yang diperoleh dari wilayah lokal Malang. Model konseptual penelitian tahap I ini dapat dinyatakan oleh skema pada Gambar 3.1.



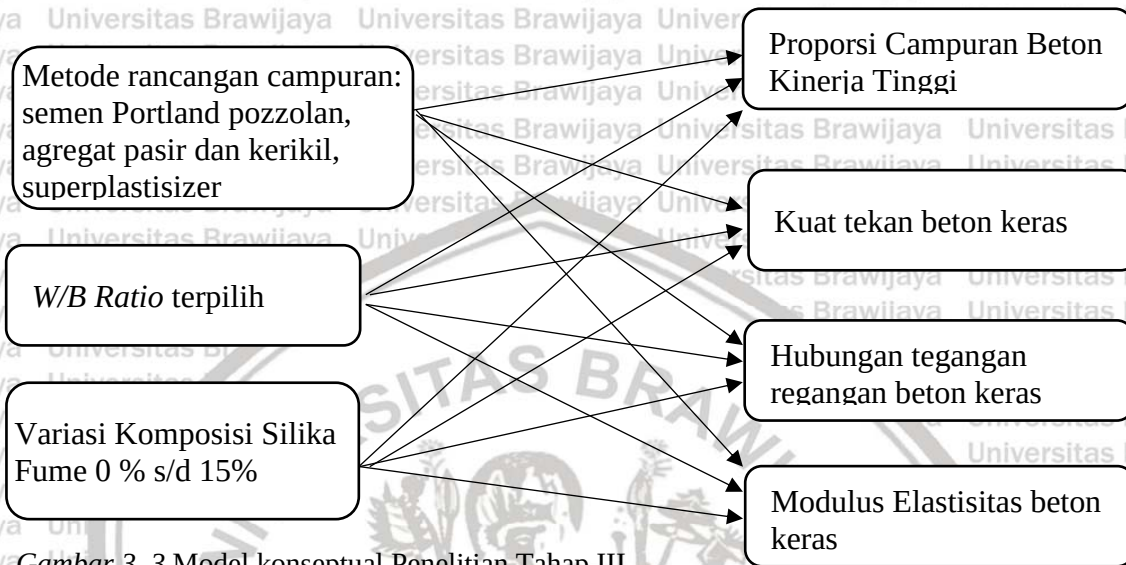
Gambar 3. 1 Model konseptual penelitian Tahap I

Hasil penelitian pada tahap I digunakan untuk menyusun proporsi campuran beton kinerja tinggi. Proporsi campuran beton ditentukan menggunakan metode volume absolut dengan melakukan variasi pada rasio air/bahan pengikat (*Water/Binder ratio*). Dengan perubahan rasio *W/B* akan mengakibatkan perubahan komposisi semen Portland Pozolan, komposisi Agregat, silika fume, maupun superplastisizer yang digunakan. Model konseptual penelitian disertasi tahap II ini diperlihatkan pada Gambar 3.2.



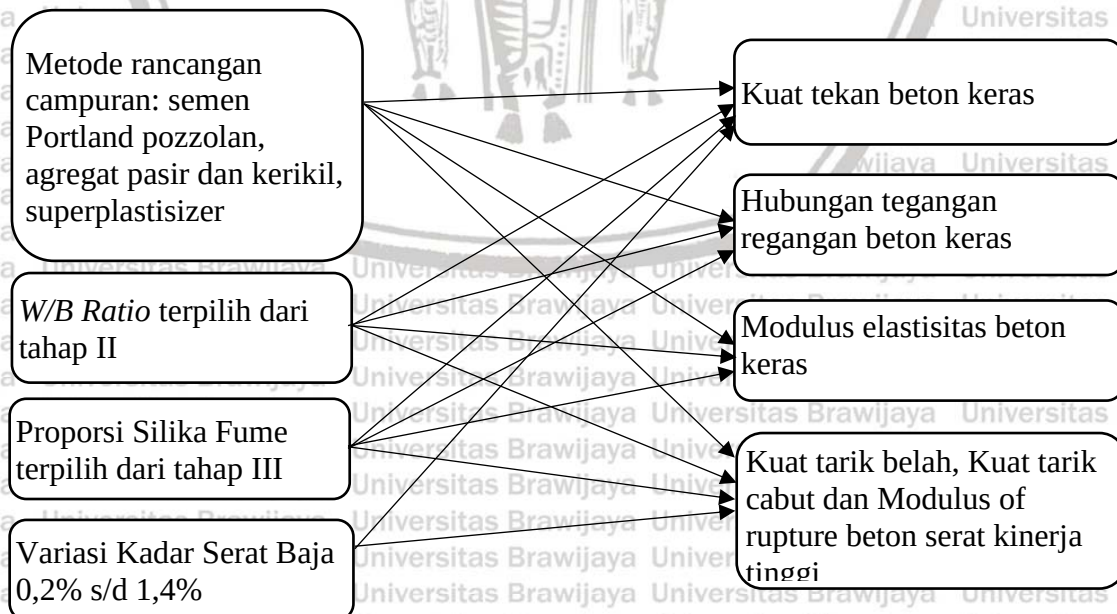
Gambar 3. 2 Model konseptual Penelitian Tahap II

Penggunaan silika fume dan penataan serat dengan proporsi dan arah orientasi tertentu akan dapat mempengaruhi sifat mikrostruktur beton serat kinerja tinggi, khususnya dalam rangka meningkatkan kinerja mekaniknya. Untuk itu model konseptual penelitian tahap III pada Gambar 3.3 digunakan untuk mengetahui sifat-sifat mekanik beton kinerja tinggi berdasarkan variasi proporsi silika fume.



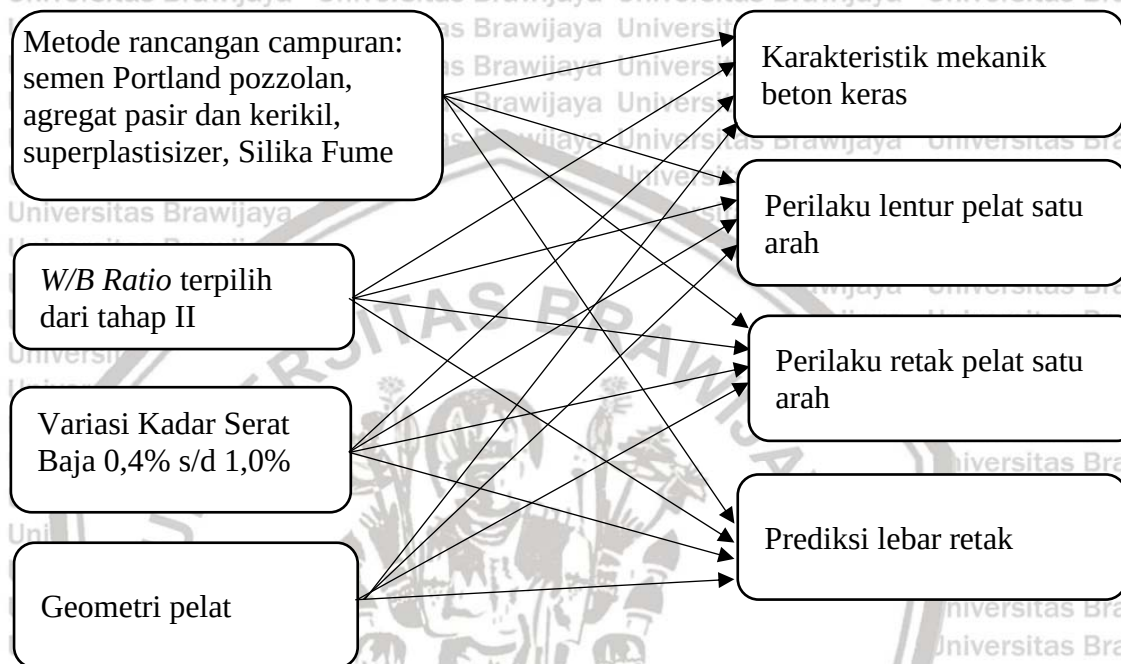
Gambar 3. 3 Model konseptual Penelitian Tahap III

Selanjutnya Gambar 3.4 memperlihatkan model konseptual penelitian tahap IV untuk mengetahui pengaruh proporsi kadar serat terhadap sifat-sifat mekanik beton serat kinerja tinggi.



Gambar 3. 4 Model konseptual Penelitian Tahap IV

Akhirnya untuk mengetahui perilaku lentur dan lebar retak pada pelat beton serat kinerja tinggi satu arah, disusun model konseptual penelitian tahap V melalui pembuatan benda uji pelat satu arah dengan melibatkan variasi kadar serat baja 0,4% hingga 1,0 % dari berat campuran beton. Pengujian pelat dilaksanakan dengan pembebanan secara monotonik dan ditingkatkan hingga terjadi keruntuhan pelat. Pengamatan dilakukan terhadap perkembangan retak dan besar lendutan yang terjadi.



Gambar 3. 5 Model konseptual Penelitian Tahap V

Dalam model konseptual penelitian ini, dosis superplastisizer yang digunakan tidak dilakukan penelitian, karena penggunaan superplastisizer mengacu pada brosur ketentuan penggunaan yang dikeluarkan oleh pabrikan. Dengan dosis yang telah ditentukan yaitu sebesar 0,8 - 2,0% terhadap berat binder.

Sebelum retak, beban tarik pada elemen struktur (balok atau pelat) menyebabkan regangan yang sama pada beton dan baja. Regangan meningkat dengan meningkatnya beban hingga kapasitas regangan dalam beton tercapai, dimana titik retak berkembang dalam beton. Pada lokasi retak, beban tarik yang bekerja ditahan sepenuhnya oleh baja. Dekat dengan retakan, terdapat *slip* antara beton dan baja, dan *slip* ini adalah faktor fundamental untuk mengontrol lebar retak. *Slip* menyebabkan perpindahan sebagian kekuatan dari baja ke beton melalui tegangan permukaan (*bond-stress*) yang bekerja pada perimeter tulangan. Oleh karena itu, beton di antara retakan berpartisipasi dalam menahan gaya tarik.

Mekanisme *bond-slip* menyebabkan regangan pada beton dan baja memiliki variasi periodik sepanjang bentang elemen.

3.3 Hipotesis

Berdasarkan kajian yang telah diuraikan dalam pembahasan di atas, maka pada penelitian ini diambil hipotesis sebagai berikut:

1. Dengan proporsi rencana campuran yang direncanakan berdasarkan karakteristik bahan penyusun beton, maka penggunaan Semen Portland Pozoland sebagai pengganti Semen Portland jenis I dan agregat lokal berupa pasir dari gunung semeru dan batu pecah yang terdapat di pasaran dalam wilayah kota Malang dengan kualitas yang terukur dapat digunakan sebagai bahan penyusun beton serat kinerja tinggi dengan kuat tekan yang telah ditentukan.
2. Perilaku lentur dan perilaku retakan pelat beton serat kinerja tinggi satu arah akan dipengaruhi oleh peningkatan kadar serat yang dipergunakan. Peningkatan kadar serat akan meningkatkan besarnya beban yang dapat ditahan oleh pelat pada saat terjadi keruntuhan. Penguatan serat (*fiber reinforcement*) dapat mengurangi lebar retak maksimum (w_{maks}) pada struktur pelat beton serat kinerja tinggi pada besaran beban yang sama sehingga kapasitas pelat dalam menahan beban layan akan meningkat. Penguatan serat akan berpengaruh pada kemampuan beton menahan tegangan tarik f_t . Hal ini ditunjukkan dengan meningkatnya kuat tarik beton serat kinerja tinggi. Dengan meningkatnya kuat tarik, maka akan berpengaruh pada efektifitas ikatan antara beton dengan tulangan baja pada pelat beton serat kinerja tinggi, sehingga terjadi reduksi lendutan dan lebar retak maksimum (w_{maks}) pada elemen pelat beton serat kinerja tinggi pada beban layan yang sama.
3. Teori mekanika retakan elastis linier akan dapat dipergunakan untuk memprediksi lebar retak maksimum pelat beton serat kinerja tinggi (w_{maks}) satu arah dengan melibatkan parameter perilaku lekatan dan perilaku lentur yang berupa tegangan tarik lentur (f_r) dan tegangan lekat (u) beton serat kinerja tinggi, perbandingan kedalaman retak terhadap ketebalan pelat (a/h), faktor geometri pelat, dan gaya-gaya dalam yang bekerja pada pelat.

3.4 Definisi Operasional dan Pengukuran Variabel

Komposisi silika fume dan kadar serat yang tepat akan meningkatkan kinerja beton serat kinerja tinggi dalam wujud meningkatnya sinergi antara kinerja kuat tekan, kuat lekat dan

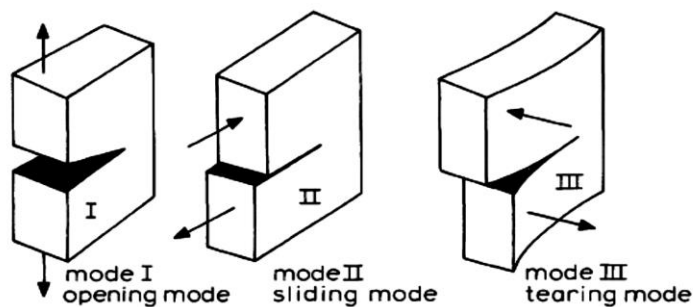
kuat tarik beton. Peningkatan kinerja kuat tarik beton akan meningkatkan penguatan tarik lentur yang juga berpengaruh pada efektifitas ikatan beton terhadap tulangan baja pada pelat beton serat kinerja tinggi. Hubungan penguatan tarik terhadap jarak dan lebar retak pelat beton dapat dirumuskan.

Pengujian perilaku lentur dan lebar retak dilakukan terhadap benda uji pelat beton bertulang yang memenuhi ketentuan kriteria beton serat kinerja tinggi dengan f_c' antara 50 MPa - 75 MPa. Serat yang digunakan adalah jenis *steel fiber Dramix@3D*. Superplastisizer yang digunakan adalah *Sika® ViscoCrete®-3115 N* yang berbentuk cairan dan berbahan dasar *polycarboxylate copolymers*. Arah serat ditentukan acak agar sesuai dengan kondisi penggunaan serat sebenarnya dalam proses konstruksi.

Tabel 3. 1 Konsep, Variabel, dan Indikator Target Utama Penelitian

Konsep	Variabel bebas dan perlakuannya	Variabel terikat	Indikator
Komposisi silika fume dan kadar serat yang tepat akan meningkatkan kinerja beton serat kinerja tinggi dalam wujud meningkatnya sinergi antara kinerja kuat tekan, kuat lekat dan kuat tarik beton. Peningkatan kinerja kuat tarik beton akan meningkatkan penguatan tarik lentur yang juga berpengaruh pada efektifitas ikatan beton terhadap tulangan baja pada pelat beton serat kinerja tinggi. Hubungan kuat tarik f_t dan kuat lekat u terhadap lebar retak w pelat beton dapat dirumuskan.	Variabel = kuat tekan, kuat tarik lentur, kuat lekat beton serat kinerja tinggi. Perlakuan: Dengan 4 variasi komposisi serat baja <i>Dramix@3D</i> sebesar 0,4% s/d 1,0% terhadap volume beton. Setiap perlakuan dilaksanakan pada 1 buah benda uji pelat dengan kuat rencana I (50 MPa - 75 Mpa).	1. Lebar dan jarak retak 2. Lendutan maksimum 3. Daktilitas 4. Degradasi kekakuan	Bekerjanya peningkatan kuat tarik beton dan kuat lekat beton dengan baja tulangan akan terlihat pada meningkatnya nilai beban yang bekerja untuk mencapai lebar retak tertentu pada saat elemen pelat mengalami kegagalan (<i>failure</i>).

Retakan pada benda padat dapat dikelompokkan menjadi tiga mode berbeda (Gambar 3.6). Gaya normal menimbulkan bukaan mode I. Perpindahan muka retakan yang terjadi tegak lurus terhadap bidang retakan. Gaya geser dalam bidang menghasilkan mode II atau "mode geser": perpindahan muka retakan berada di bidang retakan dan tegak lurus terhadap tepi utama retakan. "Mode sobekan" atau mode III disebabkan oleh gaya geser keluar bidang (*out-of-plane*). Pemindahan muka retakan berada di bidang retakan dan sejajar dengan tepi terdepan retakan. Superposisi ketiga mode tersebut menggambarkan kasus umum retak. Namun secara Teknik, retakan Mode I adalah yang paling banyak terjadi (Broek, 1982).



Gambar 3. 6 Tiga mode bukaan retakan

Sumber: (Broek, 1982)

Retak dalam struktur berkembang pada lokasi yang memiliki tegangan tertinggi dan lekatan terlemah. Hal ini dapat terjadi pada penampang tereduksi, cacat yang sudah ada sebelumnya, atau di daerah tegangan terkonsentrasi. Studi tentang bagaimana retak berkembang dan penyebarannya dalam struktur disebut sebagai *fracture mechanics* (TRB, 2006). Retak lentur adalah tipe retak yang disebabkan oleh beban luar dan terbentuk di daerah daerah tarik elemen dan memiliki bentuk irisan dengan lebar retak maksimum pada permukaan tarik dan nol pada sumbu netral (Piyasena, 2002).

Terdapat 2 mekanisme fraktur utama, yaitu fraktur pembelahan (*cleavage fracture*) dan fraktur daktail (*ductile fracture*). Kata sifat "rapuh (*brittle*)" dan "ulet (*ductile*)" digunakan untuk membedakan kegagalan atas bahan yang dikarakterisasi menggunakan istilah ketangguhan rendah dan tinggi. Fraktur pembelahan adalah bentuk fraktur yang paling rapuh yang dapat terjadi pada bahan kristal. Sedangkan fraktur daktail disebabkan oleh aplikasi beban yang melebihi kemampuan bahan menahan tarik. Fraktur daktail tidak dapat terjadi tanpa adanya deformasi plastis. Ketangguhan (*Toughness*) adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan kemampuan bahan untuk berdeformasi secara plastis dan menyerap energi sebelum dan selama proses runtuh (*rupture*) (Broek, 1982).

BAB IV METODE PENELITIAN

Penelitian perilaku lentur dan lebar retak beton serat kinerja tinggi (HPFRC) pada pelat satu arah disusun dalam bentuk bagan tahapan pekerjaan penelitian sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.1.

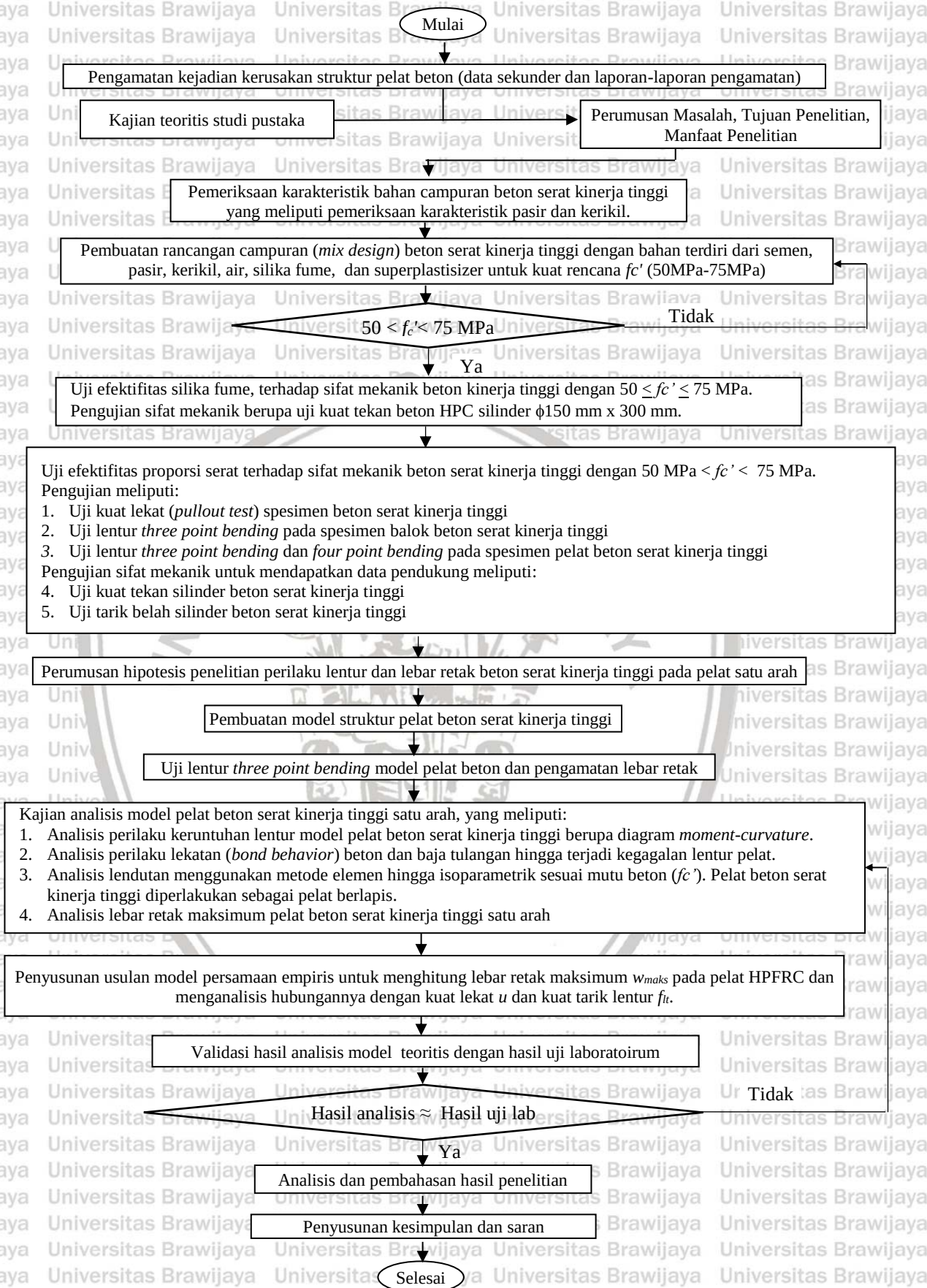
4.1 Penelitian Pendahuluan Karakteristik Beton Serat Kinerja Tinggi

Penelitian pendahuluan dilaksanakan untuk memperoleh data karakteristik bahan penyusun beton serat kinerja tinggi yang meliputi sifat fisik pasir dan kerikil yang dibutuhkan, seperti berat jenis, gradasi, dll. Di samping itu, pada bahan kerikil dilakukan pula pemeriksaan sifat mekanik berupa uji keausan agregat.

4.1.1 Pemeriksaan karakteristik bahan penyusun beton serat kinerja tinggi

Tujuan penelitian ini untuk memeriksa sifat (*properties*) semen, pasir, kerikil, dan bahan lainnya yang digunakan pada campuran beton serat kinerja tinggi. Dalam SNI 7656:2012 tentang tata cara pemilihan campuran untuk beton normal, beton berat dan beton massa, disebutkan bahwa informasi yang diperlukan mengenai data bahan yang digunakan untuk penentuan proporsi campuran adalah:

1. Analisa ayak (gradasi) agregat halus dan agregat kasar (SNI 03-1968-1990, 1990)
2. Bobot isi agregat (SNI 03-4804-1998, 1998)
3. Uji keausan agregat dengan mesin abrasi Los Angeles (SNI 2417:2008, 2008)
4. Berat jenis, penyerapan air, dan kadar air agregat (SNI 1970:2008, 2008), (SNI 1969:2008, 2008) dan (SNI 03-1971-1990, 1990).
5. Air pencampur yang dibutuhkan beton berdasarkan pengalaman dengan menggunakan agregat yang ada;
6. Hubungan antara kekuatan dan rasio air-semen atau rasio air terhadap semen+bahan bersifat semen lainnya;



Gambar 4. 1 Tahapan pelaksanaan penelitian

Alat, bahan dan parameter yang diuji untuk mengetahui sifat bahan penyusun beton serat kinerja tinggi dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Tahapan Penelitian Disertasi

No.	Tahapan	Luaran	Indikator Capaian
1	Pengamatan kejadian kerusakan struktur pelat beton	Latar belakang masalah	Data kerusakan pada pelat beton
2	Kajian teoritis studi pustaka	Tinjauan Pustaka	Tersusunnya <i>state of the art</i> dalam bidang yang diteliti berupa rangkaian teori tentang karakteristik beton serat kinerja tinggi, perilaku lentur, kuat lekat (<i>bond strength</i>) beton dan baja tulangan, dan persamaan lebar retak maksimum.
3	Perumusan masalah, tujuan, manfaat penelitian	Perumusan, tujuan dan manfaat penelitian disertasi	Tersusunnya masalah, tujuan dan manfaat penelitian disertasi
4	Pemeriksaan karakteristik bahan campuran beton HPFRC		Diperoleh data sifat fisik pasir, kerikil seperti berat jenis, gradasi, dll.
5	Penelitian kuat tekan karakteristik HPFRC	Rancangan campuran HPFRC	Tersusun komposisi rancangan campuran HPFRC dengan kisaran kuat tekan antara 50 MPa - 75 MPa.
6	Uji efektifitas butiran mikro dan komposisi serat terhadap kinerja HPFRC	Artikel Jurnal Internasional	Terdefiniskan data sifat mekanik, workabilitas, lentur dan kuat lekat beton serat kinerja tinggi dengan kisaran kuat tekan 50 MPa - 75 MPa.
7	Hipotesis penelitian	Hipotesis penelitian	Tersusun hipotesis tentang pengaruh komposisi serat terhadap perilaku lentur dan lebar retak pelat beton serat kinerja tinggi satu arah
8	Pembuatan model fisik pelat HPFRC	Model fisik pelat HPFRC	Terwujudnya benda uji pelat HPFRC
9	Uji kinerja lentur model fisik pelat HPFRC	Artikel Seminar Internasional	Diperoleh data beban, lendutan, dan lebar retak benda uji
10	Kajian analisis model pelat beton serat kinerja tinggi satu arah	Analisis perilaku runtuh pelat HPFRC	Tersusun penjelasan mekanisme retak dan perilaku gaya dalam pada pelat beton HPFRC
11	Analisis statika dengan metode elemen hingga		
11	Perumusan model persamaan empiris lebar retak pelat HPFRC	Usulan persamaan lebar retak maksimum pelat HPFRC satu arah	Tersusun persamaan lebar retak pelat HPFRC satu arah.
12	Validasi hasil pengujian dan analisis model teoritis.	Publikasi Jurnal Internasional	Tersusun kesesuaian hasil pengujian dan hasil analisis model.
13	Hasil dan pembahasan,	Draft Disertasi	Tersusun pembahasan hasil penelitian sesuai kaidah ilmu teknik sipil
14	Kesimpulan dan saran	Draft Disertasi	Tersusun kesimpulan dan saran berdasar hasil penelitian dan pembahasan disertasi

Pemeriksaan karakteristik bahan penyusun beton serat kinerja tinggi meliputi beberapa pengujian sebagaimana terlihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Pemeriksaan Karakteristik Bahan Penyusun Beton Serat Kinerja Tinggi

No.	Pengujian	Bahan	Alat	Parameter yang di uji
1	Analisa ayak (gradasi) SNI 03-1968-1990	Agregat halus; Agregat kasar	Timbangan dan neraca; Satu set saringan; Oven; Alat pemisah contoh; Mesin pengguncang saringan; Talam-talam; Kuas, sikat kuningan, sendok, dan alat-alat lainnya.	Modulus kehalusan (<i>fineness modulus</i>).
2	Bobot isi agregat SNI 03-4804-1998	Agregat halus; Agregat kasar	Timbangan; Batang penusuk; Alat penakar berbentuk silinder; Sekop atau sendok; Peralatan kalibrasi	Berat isi kering oven- <i>M</i> (kg/m^3) Berat isi kering permukaan- <i>M_{SSD}</i> (kg/m^3)
3	Uji ketahanan agregat kasar SNI 2417:2008	Agregat kasar	Mesin Abrasi <i>Los Angeles</i> ; Saringan; timbangan; bola-bola baja; oven, alat bantu pan dan kuas	Keausan (%)
4	Berat jenis dan penyerapan air agregat halus SNI 1970:2008	Agregat halus	Timbangan; Piknometer; Cetakan baja 0,8 mm; Batang penumbuk; Oven; Thermometer; Pompa vakum atau tungku; Saringan No. 4; Talam; Bejana air.	Berat jenis curah kering- <i>S_d</i> ; Berat jenis curah <i>JKP-Ss</i> ; Berat jenis semu- <i>S_a</i> ; Penyerapan air- <i>Sw</i> (%)
5	Berat jenis dan penyerapan air agregat kasar SNI 1969:2008	Agregat kasar	Timbangan; Wadah contoh uji; Tangki air; Alat penggantung; Saringan No. 4.	Berat jenis curah kering- <i>S_d</i> ; Berat jenis curah <i>JKP-Ss</i> ; Berat jenis semu- <i>S_a</i> ; Penyerapan air- <i>Sw</i> (%)
6	Kadar air agregat SNI 03-1971-1990	Agregat halus; Agregat kasar	Timbangan; oven; Talam logam tahan karat	% Kadar air agregat

4.1.2 Penyusunan rancangan campuran (*mix design*) beton kinerja tinggi

Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan komposisi rancangan campuran beton kinerja tinggi yang memenuhi kriteria kuat tekan pada kisaran 50 MPa - 75 MPa. Untuk menentukan kadar air yang digunakan, disusun rencana campuran beton kinerja tinggi dengan variasi rasio air/bahan pengikat (*W/B ratio*) antara 0,32 hingga 0,20.

Rencana campuran (*mix design*) beton kinerja tinggi disusun mengacu pada *Standard practice for selecting proportions for normal heavyweight, & mass concrete* (ACI 211.1-91, 2009), yang telah diadopsi dalam (SNI 7656:2012, 2012). Lembar kerja pembuatan rencana campuran beton kinerja tinggi sesuai ACI 211-1 telah disusun oleh Pierre Claude Aïtcin (Aïtcin, 2004) seperti pada Gambar 4.2.

Langkah pemilihan rencana campuran beton kinerja tinggi meliputi: (1) Pemilihan ukuran butir agregat maksimum; (2) Perkiraan air pencampur dan kandungan udara; (3) Pemilihan rasio air-semen atau rasio air-bahan bersifat semen; (4) Perhitungan kadar semen; (5) Perkiraan kadar agregat kasar; (6) Perkiraan kadar agregat halus; (7) Penyesuaian

terhadap kelembaban agregat; (8) Pengaturan campuran percobaan. Penjelasan atas notasi Gambar 4.2 tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Mix Weight	=	kg						
Batch ID:			MIX DESIGN SHEET					
Comp. Strength :		Mpa						
Table A	G _c	%						
Cement			Aggregate	G _{SSD}	W _{abs}	W _{tot}	W _h	
silica fume			COARSE					
			FINE					
			$W_h = W_{tot} - W_{abs}$			$M = M_{SSD} (1 + W_h)$		
SUPERPLASTICIZER		Msol = C x d / 100	$V_{liq} = (M_{sol} / (S \times G_{sup})) \times 100\%$		$V_w = V_{liq} \times G_{sup} \times ((100-s)/100)$		$V_{sol} = V_{liq} - V_w = V_{liq} [1 - ((100-s)/100) \times G_{sup}]$	
Spec. Gravity (G _{sup})	Solids dosage s (%)	15	E 24	F 21	G 11	H		
		1	2	3	4	5	6	
MATERIALS		Content kg/m ³	Volume l/m ³	Dosage SSD Conditions kg/m ³	Water correction l/m ³	Composition 1 m3 Trial Batch		
WATER	1	2	2	2	23	25		
	w/B =	3	4-1	8-1	4-1	4-1		
CEMENT						26-1		
SILICA FUME		4-2	8-2	4-2		4-2		
						26-2		
COARSE AGGREGATE	5	9	5	18	17	27		
FINE AGGREGATE		13	14	20	19	28		
AIR	PERCENT	10						
	6	%						
SUPERPASTICIZER	7	%	11	15	21	24	V _{liq}	29
TOTAL		12	16	22				30

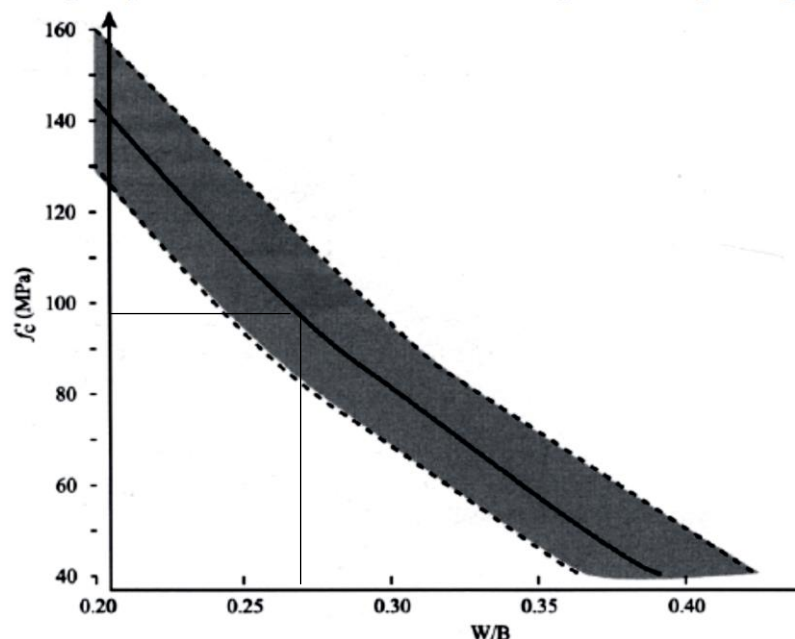
Gambar 4. 2 Lembar kerja rencana campuran beton HPC
Sumber: (Aitcin, 2004)

Tabel 4. 3 Penjelasan Notasi Lembar Kerja Rencana Campuran Beton Kinerja Tinggi

Notasi	Uraian	Satuan
G_c	Berat jenis semen atau bahan perekat	
G_{SSD}	Berat jenis agregat dalam kondisi SSD	
w_{abs}	Penyerapan air agregat	%
w_{tot}	Total kadar air dari agregat	%
w_h	Kelembaban agregat: $w_h = w_{tot} - w_{abs}$	%
G_{sup}	Berat jenis superplastisizer cair	
s	Total kadar padat superplastisizer	%
M_{sol}	Massa superplastisizer padat	
d	Dosis superplastisizer sebagai prosentase masa padat dibandingkan dengan total bahan semen	
V_{liq}	Volume superplastisizer cair	m^3
V_w	Volume air dalam superplastisizer cair	m^3
V_{sol}	Volume superplastisizer padat	m^3
W	Massa air dalam beton	Kg/m^3
B	Massa binder	Kg/m^3

Sumber: (Aïtcin, 2004)

Rasio water/binder (box no 1) didapat dari Gambar 4.3. Jumlah air dibutuhkan (box no 2), dipilih dari Gambar 4.4. Massa kerikil (box no 5), diberikan oleh Gambar 4.5.



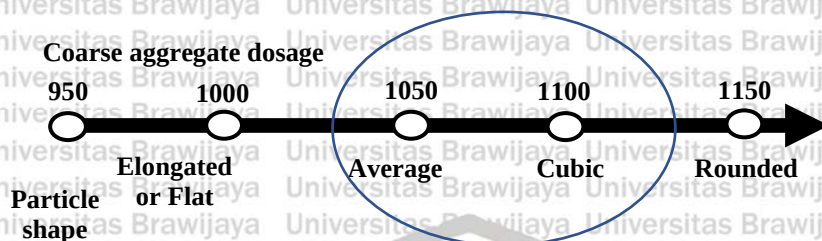
Gambar 4. 3 W/B ratio vs kuat tekan yang direncanakan

Sumber: (Aïtcin, 2004)



Gambar 4. 4 Menentukan dosis air minimum

Sumber: (Aïtcin, 2004)



Gambar 4. 5 Kandungan agregat kasar

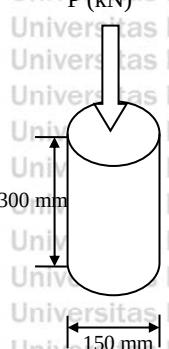
Sumber: (Aïtcin, 2004)

Uji kuat tekan dilaksanakan mengacu pada *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens* (ASTM C 39/C39M-03, 2003) dan Metode pengujian kuat tekan beton (SNI 03-1974-1990, 1990). Benda uji yang digunakan adalah silinder beton $\phi 150$ mm x 300 mm, sebanyak 3 buah. Pada tahap awal, pengujian kuat tekan juga dilakukan pada benda uji silinder beton dengan berukuran $\phi 100$ mm x 200 mm sesuai hasil penelitian (Graybeal & Davis, 2008) dan (Habel, Viviani, Denarié, & Brühwiler, 2006) untuk beton kinerja tinggi. Di samping itu juga dilakukan pengujian benda uji kubus 150 mm x 150 mm x 150 mm. Untuk benda uji silinder $\phi 150$ mm x 300 mm, di samping pengujian kuat tekan, juga dilakukan pengukuran deformasi longitudinalnya.

4.1.3 Uji efektifitas silika fume terhadap sifat mekanik beton kinerja tinggi

Penelitian ini bertujuan meneliti efektifitas kadar silika fume dalam rangka meningkatkan kinerja pelat beton serat kinerja tinggi yang divisualisasikan melalui hasil uji laboratorium. Komposisi bahan semen, agregat, dan rasio air/bahan pengikat (W/B) yang digunakan mengacu pada hasil penelitian penyusunan rancangan campuran (*mix design*) beton kinerja tinggi untuk f_c' (50 MPa - 75 MPa).

Tabel 4. 4 Model Benda Uji Silinder untuk Pengujian Efektifitas Silika Fume

	Komposisi rencana campuran untuk f_c' (50 MPa - 75 MPa). Ukuran silinder: diameter 150 mm, tinggi 300 mm Jumlah benda uji silinder: 4 x 9 = 36 benda uji Butiran Mikro yang diuji: Silika Fume Variabel beban: 1. Kadar dan ukuran butiran mikro. 2. Komposisi bahan penyusun beton HPRFC. 3. Rencana kuat tekan beton HPFRC. Variabel terikat: beban maksimum pada benda uji silinder

Peralatan yang diperlukan untuk melakukan penelitian ini adalah: 1) cetakan silinder, diameter 150 mm, tinggi 300 mm; 2) tongkat pemadat, diameter 16 mm, panjang 600 mm, dengan ujung dibulatkan, dibuat dari baja yang bersih dan bebas karat; 3) mesin pengaduk atau bak pengaduk beton kedap air; 4) timbangan dengan ketelitian 0,3% dari berat contoh; 5) mesin tekan, kapasitas sesuai kebutuhan; 6) satu set alat pelapis (*capping*); 7) peralatan tambahan : ember, sekop, sendok, sendok perata, dan talam; 8) satu set alat pemeriksa slump; 9) satu set alat pemeriksaan berat isi beton. Rencana prosentase silika fume yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Prosentase Silika Fume Terhadap Berat Semen

Butiran Mikro	Kadar 1	Kadar 2	Kadar 3	Kadar 4
Silika Fume	0%	5%	10%	15%

Dari penelitian ini diperoleh penjelasan tentang gejala atau kaidah pengendalian porositas, penurunan ukuran butir, serta pengendalian ketidakhomogenan bahan penyusun beton untuk meningkatkan kekuatan pasta semen terhidrasi dalam membentuk bahan beton kinerja tinggi. Hal-hal yang dapat dijelaskan pada penelitian ini meliputi: 1) perkembangan kuat tekan benda uji silinder dari hasil pengujian pada usia 7, 14 dan 28 hari; 2) Prosentase silika fume yang optimal untuk mencapai kuat tekan beton kinerja tinggi yang direncanakan; 3) Diperoleh nilai berat volume beton kinerja tinggi sesuai dengan prosentase silika fume yang digunakan; 4) Diperoleh nilai modulus elastisitas beton kinerja tinggi sesuai dengan prosentase silika fume yang digunakan.

4.1.4 Uji efektifitas komposisi serat terhadap sifat mekanik beton serat kinerja tinggi

Penelitian ini bertujuan menguji efektifitas serat dalam mengubah sifat mikrostruktur beton guna mencapai kualitas kinerja yang direncanakan. Perhatian diberikan pada proporsi serat dalam meningkatkan kapasitas penyerapan energi dan ketahanan terhadap retak. Dari pengujian yang dilakukan diperoleh data sifat mekanik meliputi kuat tekan, kuat tarik belah, kuat lekat (*pullout test*), perilaku lentur (*flexural behavior*) beton serat kinerja tinggi dengan kuat tekan karakteristik antara 50 – 75 MPa.

Dalam penelitian ini, digunakan serat *steel fiber Dramix® 3D* yang memiliki kuat tarik $R_{m,nom} = 1.225$ MPa dengan toleransi $\pm 7,5\%$. *Modulus Young's* = 210.000 N/mm². Panjang (l) = 60 mm. Diameter (d) = 0,75 mm. Aspek rasio (l/d) = 80. Minimum pemakaian = 10 kg/m³ (Bekaert, 2012a). Kait ujung dari *Dramix® 3D* memastikan *pullout* serat yang diharapkan. *Dramix® 3D* menghasilkan daktilitas beton melalui deformasi lambat dari kait selama proses *pullout*, dan bukan oleh daktilitas kawat itu sendiri (Bekaert, 2012b). Variasi perlakuan diwujudkan pada perubahan proporsi serat dengan penataan acak. Campuran beton kinerja tinggi yang diuji terdiri dari Semen Portland Pozolan (PPC), pasir, kerikil, air, dengan bahan tambahan silika fume, butiran mikro dan *superplasticizer* berbasis *polycarboxylate*. Rencana proporsi serat yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.6. dengan penambahan proporsi serat baja dengan kadar 0,2% (4,8 kg/m³) dan 1,4% (33,6 kg/m³) untuk mengetahui pengaruh proporsi serat diluar yang ditentukan dalam (ACI 544.1R-96, 1997) terhadap kuat lekat dan kuat tarik lentur beton serat kinerja tinggi.

Tabel 4. 6 Proporsi Serat Baja

Butiran Mikro	Satuan	FRC-1	FRC-2	FRC-3	FRC-4	FRC-5
<i>Steel Fiber</i>	Kg/m ³	4,8 kg/m ³	10 kg/m ³	15 kg/m ³	24 kg/m ³	33,6 kg/m ³
<i>Dramix @3D</i>	% volume beton	0,2%	0,4%	0,6%	1,0%	1,4%

Sumber: (Bekaert, 2012a) dan (ACI 544.1R-96, 1997)

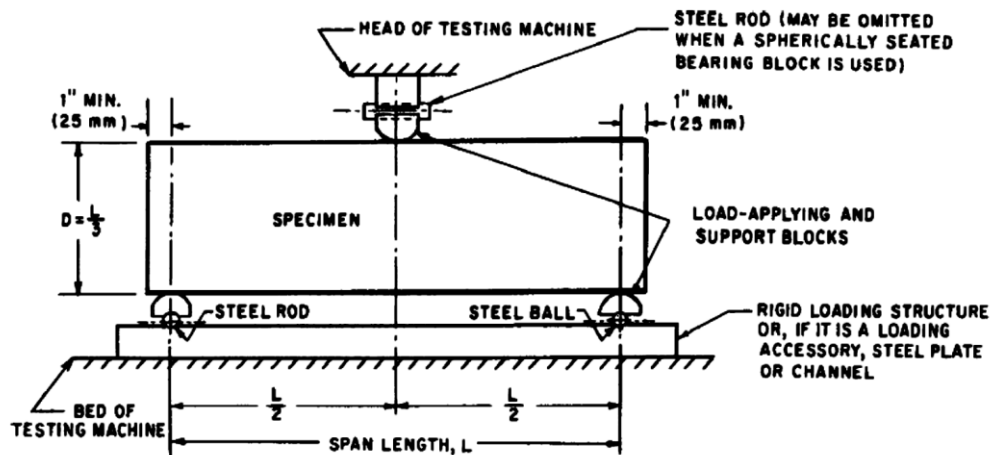
Variabel bebas dalam penelitian ini adalah: (1) Kadar serat; (2) Dimensi spesimen benda uji; (3) Rencana kuat tekan beton serat kinerja tinggi; (4) Type pengujian (*pullout test*, uji lentur *three-point bending*, dan *four point bending*). Sedangkan variabel terikat yang diperoleh melalui pengujian adalah: (1) Defleksi terbesar; (2) Beban maksimum pada benda uji silinder dan pada spesimen uji tarik belah, uji *pullout*, uji lentur spesimen balok dan uji lentur spesimen pelat.

Pengujian kinerja lentur dari spesimen beton serat kinerja tinggi dilakukan dengan cara beban diaplikasikan melalui roller tunggal di tengah bentang (*centre-point loading*) sesuai

(SNI 03-4154-1996, 1996) tentang metode pengujian kuat lentur beton dengan balok uji sederhana yang dibebani terpusat langsung atau sesuai dengan (ASTM C 293-02, 2002) sebagaimana terlihat pada Gambar 4.6. Untuk pembebanan pada *centre-point loading*, kuat lentur adalah $3PL/2bd^2$ (Newman & Choo, 2003).

Tabel 4. 7 Parameter dan Jumlah Benda Uji untuk Pengujian Efektifitas Komposisi Serat

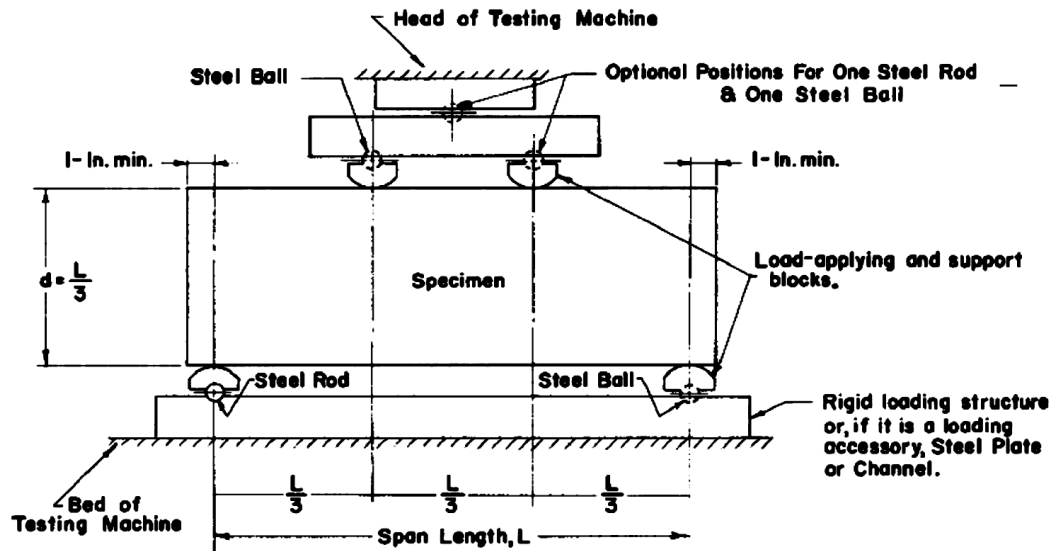
NO.	Pengujian	Dimensi Benda uji (mm)	Arah serat	Jumlah benda uji	Parameter uji
1	Uji lentur balok <i>three point bending</i> SNI 03-4154-1996	Balok 150x150x600 dengan 5 macam proporsi serat	Acak	3x5 = 15 bh	Dimensi spesimen (mm); Usia benda uji; Jarak tumpuan (mm); Beban maximum (Newton); Kuat lentur (MPa)
2	Uji lentur pelat <i>three point bending</i>	Pelat 50x150x600 dengan 5 macam proporsi serat	Acak	3x5 = 15 bh	
3	Uji lentur pelat <i>four point bending</i> . SNI 4431:2011	Pelat 50x150x600 dengan 5 macam proporsi serat	Acak	3x5 = 15 bh	
4	Uji <i>Pullout</i> Strength ASTM C900-01	Silinder dia. 150 mm pjng 300 mm, tulangan D10 dengan 5 macam proporsi serat	Acak	3x5 = 15 bh	Beban <i>pullout</i> max (KN), Dimensi benda uji (mm), Diameter tulangan (mm) dan Panjang tulangan tertanam (mm)
5	Uji tarik belah silinder SNI 03-2491-2002	Silinder dia. 150 mm panjang 300 mm dengan 5 macam proporsi serat	Acak	3x5 = 15 bh	f_{ct} (MPa); P (Newton); L (mm); D (mm)
6	Uji kuat tekan silinder SNI 03-1974-1990	Silinder dia. 100 mm, panjang 200 mm dengan 5 macam proporsi serat	Acak	3x5 = 15 bh	f_{ci} (MPa); P (Newton); A (mm ²); Tipe retakan; Cacat pada spesimen; Umur benda uji.



Gambar 4. 6 Uji lentur beton dengan metode *center-point loading*

Sumber: (ASTM C 293-02, 2002)

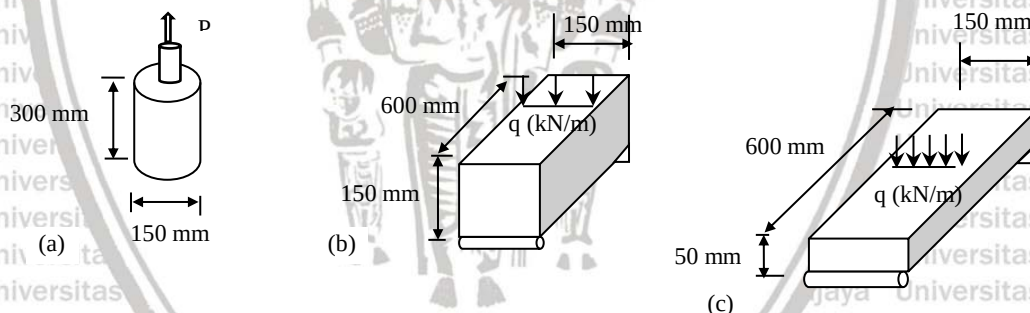
Di samping itu juga terdapat metode pengujian sesuai dengan *Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)* (ASTM C 1609/C1609M-12, 2012) dan *Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading)* (ASTM C 78-02, 2002) yang telah diacu dalam Cara uji kuat lentur beton normal dengan dua titik pembebanan (SNI 4431:2011, 2011). Alat uji berupa balok beton prismatik ditumpu bantalan rol baja pada kedua ujungnya, dan dibebani melalui bantalan baja serupa yang ditempatkan pada titik-titik ketiga (*the third points*) pada sisi atas (*two-point loading*) seperti pada Gambar 4.7. Kuat lentur (tegangan tarik maksimum pada permukaan bawah) adalah PL/bd^2 (MPa) dengan P adalah beban total (N), L adalah jarak antara rol pendukung yang lebih dekat (mm), serta b dan d adalah lebar rata-rata (mm) dan tebal rata-rata (mm) dari balok (Newman & Choo, 2003).



Gambar 4. 7 Uji lentur beton dengan metode *third-point loading*

Sumber: (ASTM C 78-02, 2002)

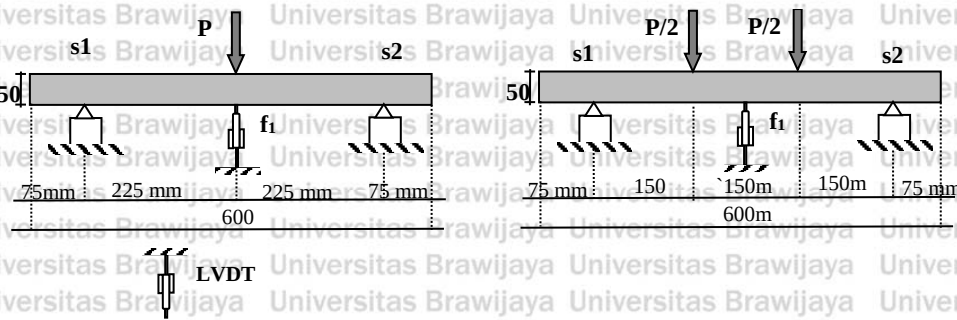
Pengujian *three-point bending* atau *center-point loading* dilakukan pada spesimen balok berukuran 600 mm x 150 mm x 150 mm tanpa tulangan dan pada spesimen pelat dengan menggunakan benda uji berukuran 600 mm x 150 mm x 50 mm tanpa tulangan dengan spesimen benda uji seperti pada Gambar 4.8.



Gambar 4. 8 Model spesimen beton serat kinerja tinggi: (a) Spesimen uji *pullout*, (b) Spesimen balok dan (c) Spesimen pelat lentur

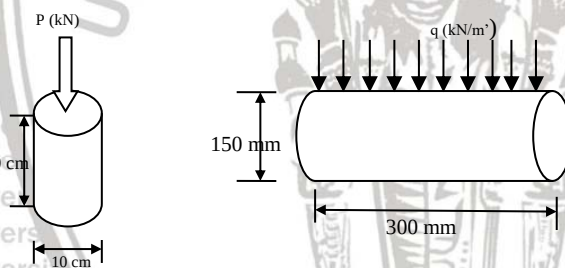
Pengujian *four-point bending* hanya dilakukan pada spesimen pelat tanpa tulangan.

Konfigurasi pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.9. Spesimen balok diuji dengan menggunakan universal testing machine dengan kapasitas 1000 kN pada laju pembebanan 6×10^{-6} m/detik. Defleksi diukur menggunakan LVDT. Beban dari alat juga dicatat. Sedangkan untuk spesimen pelat dilakukan pengujian menggunakan frame uji yang dilengkapi dengan dongkrak beban dan *Load Cell* 20 ton, LVDT, serta dihubungkan dengan peralatan *Data Logger* untuk mendapat pembacaan data yang baik.



Gambar 4. 9 Konfigurasi uji lentur spesimen benda uji pelat beton serat kinerja tinggi
(a) *Three-point bending* dan (b) *Four-point bending*.

Uji kuat tekan dilaksanakan mengacu pada *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens* (ASTM C 39/C39M-03, 2003) dan Metode pengujian kuat tekan beton (SNI 03-1974-1990, 1990). Kuat tarik belah beton serat kinerja tinggi ditentukan menurut *Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens* (ASTM C 496/C496M-04, 2004) yang disesuaikan dengan metode pengujian kuat tarik belah beton (SNI 03-2491-2002, 2002). Benda uji kuat tekan dan kuat tarik belah dibuat minimal 1 buah setiap kali dilakukan pengecoran spesimen balok dan pelat.

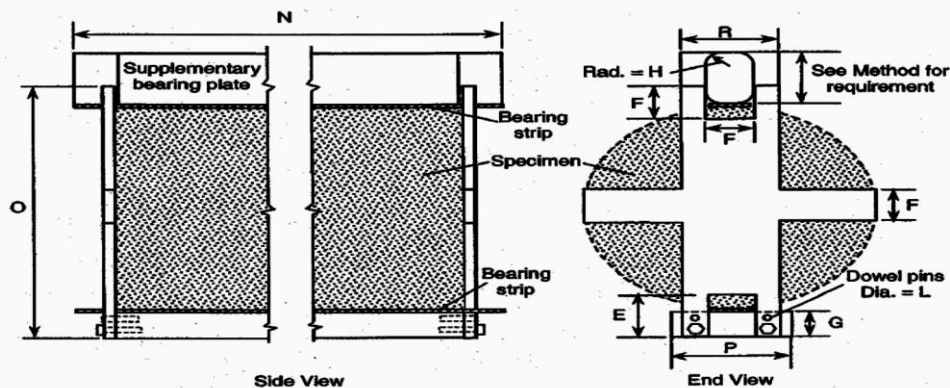


Gambar 4. 10 Spesimen untuk uji kuat tekan dan uji kuat tarik belah

Pada uji tarik belah, silinder ditempatkan di antara pelat pada mesin uji tekan standar dengan sumbu horisontal. Gaya diterapkan sepanjang diameter vertikal melalui kayu lapis tipis atau kemasan *strip hard board* yang diletakkan antara silinder dan pelat mesin. Pemberian beban dilakukan secara menerus tanpa sentakan dengan kecepatan pembebanan konstan yang berkisar antara 0,7 hingga 1,4 MPa per menit sampai benda uji hancur. Kecepatan pembebanan untuk benda uji berbentuk silinder dengan ukuran panjang 300 mm dan diameter 150 mm berkisar antara 50 sampai 100 kN per menit. Keruntuhan terjadi dengan terbelahnya silinder dan kuat tarik belah dari benda uji adalah $f_{ct} = 2P/\pi DL$, dengan P adalah beban uji maksimum (beban belah / hancur) dalam newton (N) yang ditunjukkan

mesin uji tekan; D diameter benda uji dalam mm dan L panjang benda uji dalam mm (SNI 03-2491-2002, 2002).

Untuk semua spesimen pengujian, tegangan dan regangan terkait beban yang bekerja dicatat. Diagram tegangan-regangan beton serat kinerja tinggi akan digunakan untuk menunjukkan perilaku linier hingga tegangan tekan puncak tercapai. Selanjutnya kemiringan awal dari diagram tegangan-regangan (hingga 85% tegangan maksimum) digunakan untuk mengevaluasi modulus elastisitas beton serat kinerja tinggi.



Gambar 4. 11 Detail uji tarik belah spesimen silinder 150 x 300 mm
Sumber: (ASTM C 496/C496M-04, 2004)

4.2 Pembuatan Struktur Pelat untuk Uji Hipotesis Penelitian

1. Pembuatan pelat beton serat kinerja tinggi satu arah

Ukuran pelat mengacu ketentuan $tebal\ pelat = 1/20 \times bentang\ pelat$, agar pelat menjadi pelat sebenarnya. Pelat satu arah adalah suatu pelat beton bertulang yang angka perbandingan antara bentang yang panjang (l_y) dengan bentang yang pendek (l_x) sama atau lebih besar dari 2 (Nawy, 1990). Oleh karena itu geometri pelat beton serat kinerja tinggi dalam penelitian ini berukuran panjang 2.000 mm, tebal pelat $h = 80$ mm, dan lebar pelat $b = 900$ mm. Tebal selimut beton adalah $c = 20$ mm.

Properti dan dimensi pelat satu arah adalah seperti pada Tabel 4.8. Tulangan yang digunakan mengacu pada rasio tulangan terhadap luas penampang beton di atas tulangan minimal. Kuat leleh (f_y) baja tulangan ulir dengan diameter 10 mm (D-10) adalah 459,37 MPa dengan modulus elastisitas $E_s = 200.000$ MPa. Spasi bersih batang baja tulangan dalam pelat adalah 150 mm. Batang baja polos sebagai sengkang spesimen dengan diameter 8 mm (ϕ -8) dengan spasi antar sengkang adalah 200 mm, dan nilai f_y diperkirakan 450 MPa.

Tabel 4. 8 Dimensi Penampang dan Penulangan Pelat Satu Arah

Dimensi Pelat			Karakteristik Pelat			Tul. Longitudinal		Tul. Senggang	
b (mm)	h (mm)	L (mm)	d (mm)	f'_c (MPa)	E_c (MPa)	Dia.	f_y	Dia.	f_y
900	80	2000	20	50 - 75	35.652	10 mm	459 Mpa	8 mm	450 Mpa

Berdasarkan (ACI 363R-92, 1997) maka sifat-sifat bahan untuk pelat beton serat kinerja tinggi diperkirakan akan memiliki nilai-nilai sebagaimana terlihat pada Tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Sifat-sifat Bahan Pelat Beton Serat Kinerja Tinggi

No.	Uraian	Nilai
1	Kuat tekan silinder beton, f'_c (MPa)	50 - 75
2	Modulus Rupture, $f_r = 0,94 \sqrt{f'_c}$ (MPa)	6,65 - 8,14
3	Modulus Young, $E_c = 3320 \sqrt{f'_c} + 6900$ (MPa)	30.376 - 35.652
4	Angka Poisson (ν)	0,20
5	Kuat tarik belah, $f_{ct} = 0,59 \sqrt{f'_c}$ (MPa)	4,17 - 5,11
6	Prosentase tulangan tarik	0,85%

Sumber: (ACI 363R-92, 1997)

Variasi proporsi serat baja yang digunakan untuk benda uji pelat pada penelitian ini mengikuti ketentuan-ketentuan yang terdapat pada petunjuk penggunaan *steel fiber Dramix @3D* (Bekaert, 2012a) dan *State-of-the-art report on fiber reinforced concrete* (ACI 544.1R-96, 1997) sebagaimana terlihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4. 10 Proporsi Serat Baja pada Benda Uji Pelat

Butiran Mikro	Satuan	HPFRC-1	HPFRC-2	HPFRC-3	HPFRC-4
Steel Fiber	Kg/m ³	10	14,4	19,2	24
Dramix @3D	% volume beton	0,4	0,6	0,8	1,0

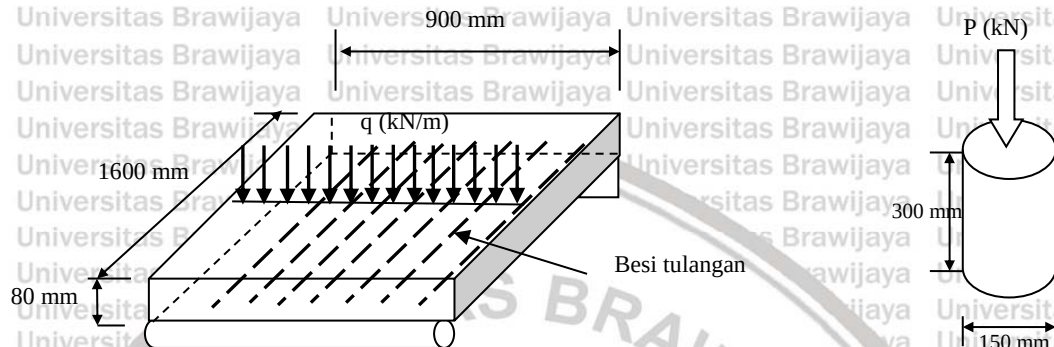
Sumber: (Bekaert, 2012a) dan (ACI 544.1R-96, 1997)

2. *Pencampuran bahan beton serat kinerja tinggi*

Sebuah mixer dengan kapasitas 120 liter digunakan untuk mencampur bahan beton serat kinerja tinggi. Pasir dan butiran mikro dicampur secara kering selama 3-5 menit. Setelah itu, semen ditambahkan dan pencampuran dilanjutkan selama 3 menit. Setengah dari *superplasticizer* dicampur dengan air pencampur dan ditambahkan secara bertahap ke dalam campuran kering dan pencampuran dilanjutkan selama 3 menit. Setelah itu, sisa dari *superplasticizer* ditambahkan selama 3 menit pencampuran. Pada akhirnya, serat ditambahkan dan pencampuran dilanjutkan sampai serat sepenuhnya tersebar. Total waktu pengadukan campuran minimal adalah 12 menit.

3. **Penyiapan benda uji dan perawatan di laboratorium**

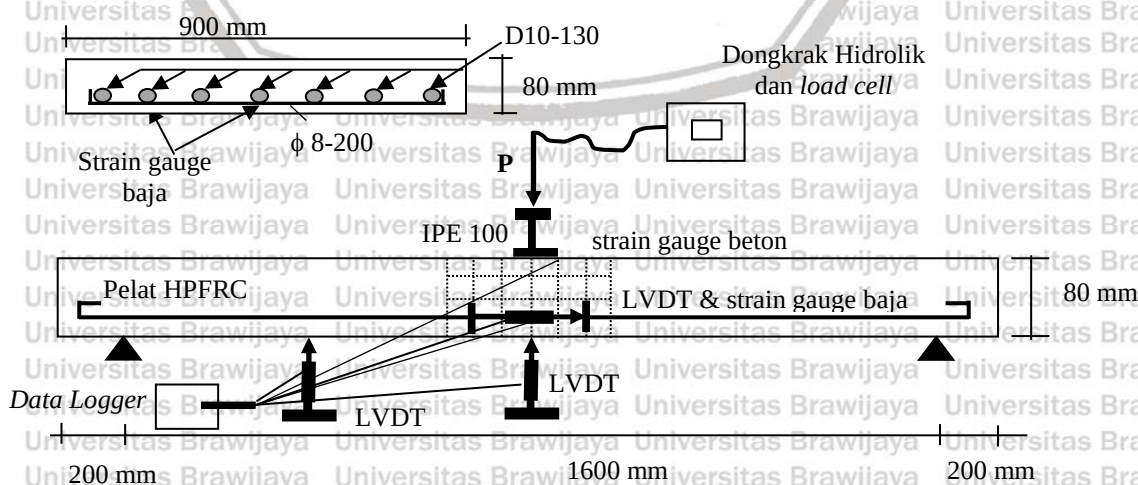
Dalam pelaksanaan pencampuran beton serat kinerja tinggi, setiap satu kali pengecoran pelat, juga dicetak 5 buah benda uji silinder 150 mm x 300 mm yang digunakan untuk uji kuat tekan, uji tarik belah dan uji *pull out* baja tulangan polos. Pengecoran pelat beton serat kinerja tinggi dan benda uji silinder dilaksanakan dalam tiga lapisan. Setiap lapisan dipadatkan menggunakan vibrator. Setelah itu, model benda uji pelat dan silinder disimpan pada kondisi laboratorium standart.



Gambar 4. 12 Model benda uji lentur pelat beton serat kinerja tinggi

4. **Pelaksanaan uji pembebanan**

Pelaksanaan pembebanan dan pengukuran besaran dilaksanakan di laboratorium. Beban aksial terdiri dari berat sendiri dan beban kerja yang ditingkatkan secara konstan. Setting pengujian seperti terlihat pada Gambar 4.13. Pengujian ini dilakukan dengan melakukan kontrol beban yang di amati pada pembacaan *Load Cell*. Selanjutnya sesudah pelat runtuh dilanjutkan dengan kontrol perpindahan yang diamati pada *Data Logger* dari pembacaan data transduser perpindahan di tengah bentang spesimen prismatik. Penambahan beban dilaksanakan sebesar 100 kg.



Gambar 4. 13 Setting up uji lentur pelat beton serat kinerja tinggi

Beban retak pertama adalah titik dimana porsi elastis linier awal dari diagram beban-defleksi lentur berakhir, sementara puncak beban adalah nilai beban maksimum pada diagram beban-defleksi. Lebar retak untuk masing-masing kondisi beban diukur menggunakan pengukur lebar retak (*Crack Detector*) serta kombinasi pengukuran menggunakan LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*) di samping pelat dan *strain gauge* baja pada level baja tulangan. Lebar retak juga diperhitungkan dengan menggunakan analisis bond-stress dan bond-slip pada pemeriksaan tegangan lekat pelat beton HPFRC setiap kali terjadi retakan baru pada pelat hingga terjadi keruntuhan.

5. **Pengukuran parameter kinerja atau variabel terikat serta analisisnya**

Parameter kinerja pelat yang diukur dalam penelitian ini adalah beban maksimum pelat, daktilitas elemen pelat, lebar retak maksimum, energi disipasi dan degradasi kekakuan pelat beton serat kinerja tinggi. Kapasitas kekuatan maksimum diambil dari diagram beban defleksi atau diagram tegangan regangan. Nilai daktilitas ditentukan dari perbandingan perpindahan ultimit dan perpindahan leleh.

4.3 Analisis Gaya Dalam pada Pelat Beton Serat Kinerja Tinggi

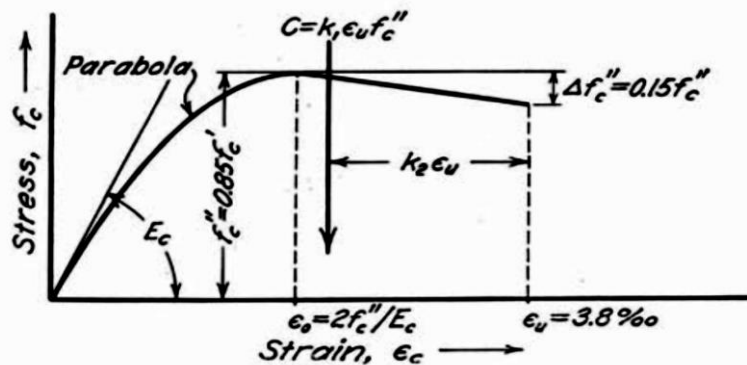
Analisis gaya dalam dilakukan dengan cara meningkatkan (*increment*) nilai regangan beton ε_c hingga terjadi keruntuhan seluruh sistem pelat beton serat kinerja tinggi atau apabila tercapai nilai $\varepsilon_c = 0,0038$. Terdapat 5 tahap analisis gaya dalam sejak dimulainya pemberian pembebanan hingga terjadi keruntuhan pelat, yaitu (1) pada saat belum terjadi retakan pertama pada pelat; (2) pada saat terjadi retakan pertama; (3) pada saat tegangan baja meningkat hingga mencapai tegangan lelehnya ($f_s = f_y$) atau $\varepsilon_{st} = 0,002$; (4) pada saat tegangan tekan beton meningkat hingga mencapai nilai tegangan tekan karakteristiknya f_c' atau $\varepsilon_c = 0,002$; dan (5) pada saat regangan beton tekan meningkat hingga mencapai $\varepsilon_c = 0,0038$.

Sebelum terjadi retakan pertama, proses *trial and error* dilakukan dengan mengubah nilai regangan beton hingga momen retak pertama uji lentur tercapai. Proses *trial and error* dilakukan juga untuk mendapatkan lokasi garis netral k_d hingga tercapai kesetimbangan gaya aksial pada penampang pelat. Pada saat terjadi retakan pertama, tegangan baja f_{st} akan berubah secara drastis, dan tegangan pada beton yang mengalami gaya tarik f_{ct} akan mencapai nilai *modulus of rupture* (f_r). Perhitungan gaya dalam dilakukan dengan proses *trial and error* untuk menentukan lokasi garis netral. Proses dilakukan terus dengan cara meningkatkan tegangan baja tulangan hingga retak pertama pada beton yang mengalami

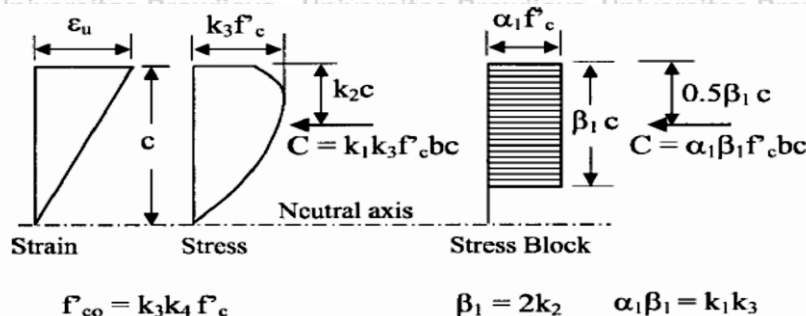
tarik tercapai atau terjadi retak pada sisi tarik pelat. Setelah retak pertama, nilai tegangan tarik baja (f_s) terus ditingkatkan hingga tegangan leleh baja tulangan (f_y) tercapai. Tegangan tarik beton menggunakan nilai f_r maksimal. Proses *trial and error* dilakukan untuk mencari lokasi garis netral kd . Setelah baja tulangan leleh, perhitungan dilakukan dengan meningkatkan regangan beton ϵ_c seperti pada saat pelat belum retak, tetapi nilai f_y dan f_r maksimum. Melalui proses *trial and error* lokasi garis netral kd ditentukan. Perhitungan dilakukan hingga kuat tekan karakteristik f_c' dicapai, yaitu saat $\epsilon_c = 0,002$. Apabila pelat belum juga mengalami keruntuhan, regangan tekan beton ditingkatkan kembali hingga tercapai $\epsilon_c = 0,0038$ dengan menggunakan nilai maksimum kuat tarik baja f_y , Modulus Rupture beton f_r , dan kuat tekan beton f_c' .

4.3.1 Distribusi tegangan-regangan lentur penampang pelat.

Distribusi tegangan regangan pada penampang transversal pelat dimana momen lentur maksimum kurang dari yang diperlukan untuk membentuk retak lentur diperlihatkan pada Gambar 4.14 yang diajukan oleh Hognestad (1951) dan dibahas kembali oleh Ozbakkaloglu & Saatcioglu (2004) sebagai blok tegangan persegi untuk beton berkekuatan tinggi pada Gambar 4.15.



Gambar 4. 14 Asumsi tegangan-regangan dalam lentur



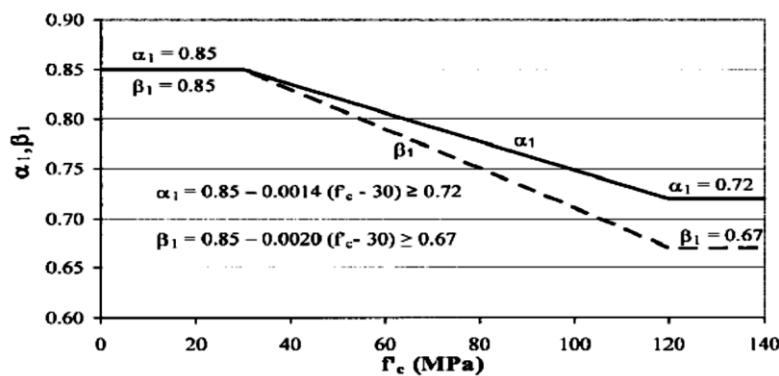
Gambar 4. 15 Blok tegangan persegi
Sumber: (Ozbakkaloglu & Saatcioglu, 2004)

Nilai k_1 , k_2 dan k_3 yang digunakan untuk menghitung besarnya gaya C pada dapat dilihat pada parameter blok tegangan pada kuat lentur penampang persegi pada Tabel 4.11 untuk beton dengan kuat tekan hingga $f_c' = 48,3$ MPa. Sedangkan untuk beton dengan mutu lebih tinggi dapat mempergunakan hubungan persamaan pada Gambar 4.15 dan Gambar 4.16.

Tabel 4. 11 Parameter Blok Tekan pada Kuat Lentur Penampang Persegi

f_c' (N/mm ²)	k_1	k_2	k_3	ε_c
13,8	0,86	0,48	1,03	0,0037
20,7	0,82	0,46	0,97	0,0035
27,6	0,79	0,45	0,94	0,0034
34,5	0,75	0,44	0,92	0,0032
41,4	0,71	0,42	0,92	0,0031
48,3	0,67	0,41	0,93	0,0029

Sumber: (Park & Paulay, 1975)



Gambar 4. 16 Variasi nilai α_1 dan β_1 terkait dengan kuat tekan beton f_c'

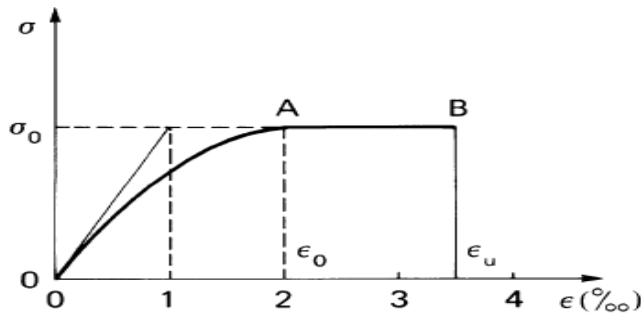
Sumber: (Ozbakkaloglu & Saatcioglu, 2004)

Distribusi regangan dianggap bervariasi linier sepanjang ketebalan pelat. Distribusi tegangan yang dihasilkan ditentukan menggunakan hubungan tegangan-regangan (Gambar 4.14) yang diberikan oleh persamaan (Hognestad, 1951):

$$\Phi(\varepsilon_c) = f_c' \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \text{ MPa jika } \varepsilon_c \leq \varepsilon_0 \quad (4-1a)$$

$$\text{dan } \Phi(\varepsilon_c) = f_c' - 0,83f_c' (\varepsilon_c - \varepsilon_0) \text{ MPa jika } \varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_u \quad (4-1b)$$

dengan $\Phi(\varepsilon_c)$ = tegangan beton; ε_c = regangan beton; f_c' = kuat tekan karakteristik beton; $\varepsilon_0 = 0,002$, dan $\varepsilon_u = 0,0038$.



Gambar 4. 17 Hubungan tegangan regangan untuk beton tekan.
Sumber: (Carpinteri, 1986)

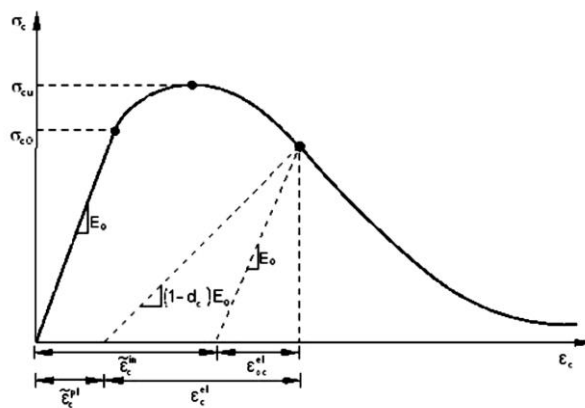
Carpinteri (1986) mengganti asumsi persamaan (4-1b) dengan menyatakan bahwa perilaku plastis sempurna terjadi hingga dicapainya regangan ultimit, $\epsilon_u = 3,5 \times 10^{-3}$, ketika terjadi keruntuhan seperti pada Gambar 4.17.

Tabel 4. 12 Hubungan Tegangan Regangan untuk Perilaku Non-linier Struktur

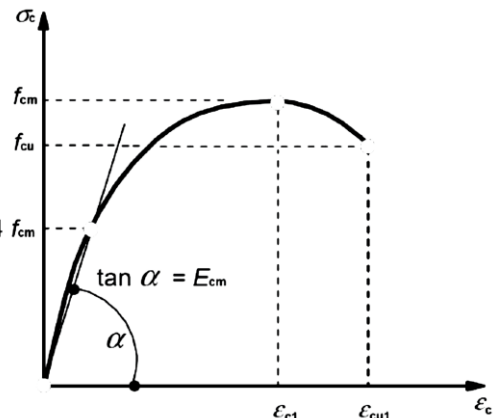
Nama rumusan/sumber	Susunan rumusan	Variabel
Parabola Madrid	$\sigma_c = E_c \epsilon_c \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} \right) \right]$	$\sigma_c = f(E_c, \epsilon_{c1})$
Formula Desay & Krishnan	$\sigma_c = \frac{E_c \epsilon_c}{1 + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} \right)^2}$	$\sigma_c = f(E_c, \epsilon_{c1})$
EN 1992-1-1	$\sigma_c = f_{cm} \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta}$ $k = 1,05 E_{cm} \frac{\epsilon_{c1}}{f_{cm}}, \eta = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}}$	$\sigma_c = f(E_{cm}, f_{cm}, \epsilon_{c1})$
Formula Majewski	$\sigma_c = E_c \epsilon_c$ jika $\sigma_c \leq e_{lim} f_{cm}$ $\left. \begin{aligned} \sigma_c &= f_{cm} \frac{(e_{lim}-2)^2}{4(e_{lim}-1)} \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} \right)^2 - \\ &f_{cm} \frac{(e_{lim}-2)^2}{2(e_{lim}-1)} \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} \right) + f_{cm} \frac{e_{lim}^2}{4(e_{lim}-1)} \end{aligned} \right\} E_c = \frac{f_{cm}}{\epsilon_c}$ jika $\sigma_c > e_{lim} f_{cm}$	$\sigma_c = f(E_c, f_{cm}, \epsilon_{c1})$
Formula Wang & Hsu	$\sigma_c = \zeta f_{cm} \left[2 \left(\frac{\epsilon_c}{\zeta \epsilon_{c1}} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\zeta \epsilon_{c1}} \right)^2 \right]$ jika $\frac{\epsilon_c}{\zeta \epsilon_{c1}} \leq 1$ $\sigma_c = \zeta f_{cm} \left[1 - \left(\frac{\frac{\epsilon_c}{\zeta \epsilon_{c1}} - 1}{2/\zeta - 1} \right)^2 \right]$ jika $\frac{\epsilon_c}{\zeta \epsilon_{c1}} > 1$	$\sigma_c = f(f_{cm}, \epsilon_{c1})$
Formula Sáenz	$\sigma_c = \frac{\epsilon_c}{A + B \epsilon_c + C \epsilon_c^2 + D \epsilon_c^3}$	$\sigma_c = f \left(\frac{E_{cm}, f_{cm}, f_{cu}}{\epsilon_{c1}, \epsilon_{cu1}} \right)$

Sumber: (Kmieciak & Kaminski, 2011)

Kmiecik & Kaminski (2011) juga merangkum berbagai hubungan tegangan regangan untuk perilaku non-linier struktur seperti terlihat pada Tabel 4.12. Serta menggambarkan definisi regangan inelastis pada Gambar 4.18 dan diagram tegangan-regangan untuk analisis struktur menurut Eurocode-2 pada Gambar 4.19.



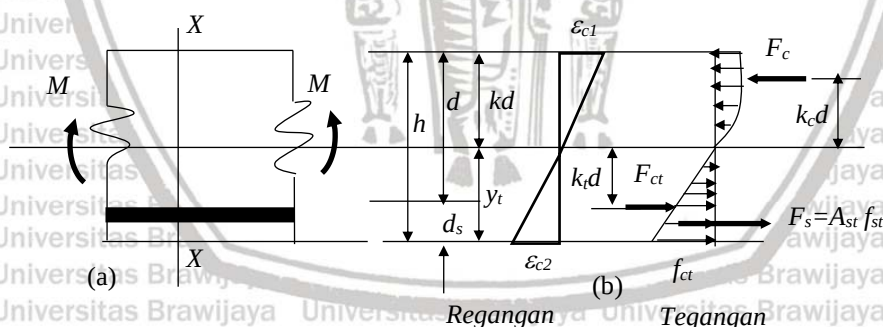
Gambar 4. 18 Definisi regangan inelastis
Sumber: (Kmiecik & Kaminski, 2011)



Gambar 4. 19 Diagram tegangan-regangan untuk analisis struktur menurut Eurocode 2
Sumber: (Kmiecik & Kaminski, 2011)

4.3.2 Analisis gaya dalam sebelum terjadi retakan.

Sebelum retak, tegangan beton f_t pada sisi tarik belum mencapai nilai f_r pada seluruh bentang pelat, dengan f_r adalah *modulus of rupture* beton serat kinerja tinggi.



Gambar 4. 20 Distribusi tegangan-regangan penampang transversal pelat tidak retak. (a) bagian pelat tidak retak; (b) distribusi tegangan-regangan pada penampang X-X
Sumber: (Piyasena, 2002)

Untuk momen lentur M yang bekerja pada penampang pelat tidak retak, distribusi tegangan yang ditunjukkan oleh Gambar 4.20(b) dapat dievaluasi jika regangan beton maksimum ϵ_{c1} dan ketebalan daerah tekan kd diketahui. Kedua parameter yang tidak diketahui ini dapat diselesaikan dengan cara mengikuti persamaan simultan yang dijabarkan

dari kondisi kesetimbangan translasi dan rotasi penampang. Untuk kesetimbangan translasi, persamaannya adalah:

$$F_c = F_{ct} + A_{st} f_{st} \quad (4-2)$$

Untuk kesetimbangan rotasi:

$$M = F_c k_c d + F_{ct} y_t + A_{st} f_{st} (d - k d) \quad (4-3)$$

dengan: F_c dan F_{ct} = gaya tekan dan tarik yang diberikan oleh beton; A_{st} = luas baja tarik total; f_{st} = tegangan baja tarik; $k_c d$ dan $k_t d$ = jarak dari sumbu netral ke pusat blok tegangan tekan dan tarik.

Total gaya tekan F_c yang bekerja pada penampang diperoleh melalui integrasi persamaan (4-4):

$$F_c = \int_{y=0}^{y=kd} b \Phi(\varepsilon(y)) dy \quad (4-4)$$

dengan b dan $\varepsilon(y)$ adalah lebar dan regangan pada jarak y di atas garis netral; dan $\Phi(\varepsilon(y))$ adalah tegangan tekan yang dihitung menggunakan persamaan (4-1). Regangan beton tekan ε_c atau $\varepsilon(y)$ pada setiap jarak y dihitung dari persamaan (4-5).

$$\varepsilon(y) = \frac{y}{k d} \varepsilon_{c1} \quad (4-5)$$

Jarak sumbu netral ke pusat blok tegangan tekan $k_c d$ diperoleh dari persamaan (4-6).

$$F_c k_c d = \int_{y=0}^{y=kd} b \Phi(\varepsilon(y)) y dy \quad (4-6)$$

Total gaya tarik F_{ct} dapat dihitung dengan integral pada persamaan (4-7).

$$F_{ct} = \int_{y_t=0}^{y_t=h-kd} b \left(E_{ct} \frac{\varepsilon_{c1}}{k d} y_t \right) dy_t \quad (4-7)$$

dengan y_t diukur dari sumbu netral menuju permukaan tegangan tarik. E_{ct} adalah modulus elastisitas beton tarik dan h adalah tebal pelat total. Modulus elastisitas beton tarik diambil dari modulus tangen awal tekan, yang nilainya sama dengan $E_{ct} = 1000 f'_c$ untuk hubungan yang didefinisikan oleh persamaan (4-1a) (Piyasena, 2002).

Tegangan tarik tulangan f_{st} dihitung menggunakan persamaan regangan (4-8).

$$f_{st} = E_s \left[\frac{d-kd}{k d} \right] \varepsilon_{c1} \quad (4-8)$$

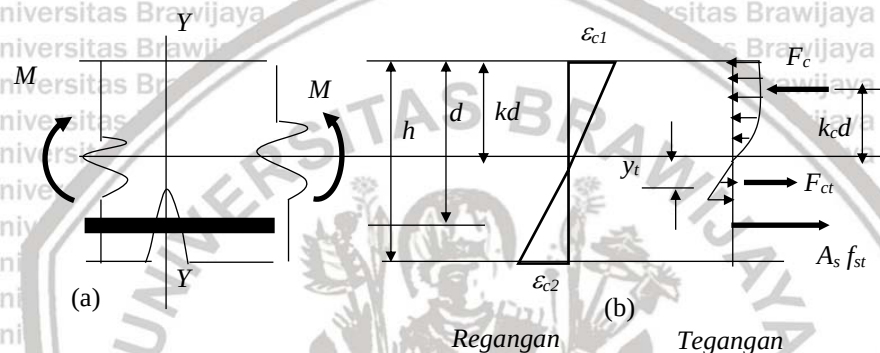
Dengan E_s adalah modulus elastisitas baja tulangan. Untuk menentukan tegangan baja dan beton pada saat momen lentur $M \leq M_{cr}$, persamaan (4-3) harus diselesaikan. Sedangkan *curvature* atau gradien profil regangan elemen pelat HPFRC dapat dihitung dengan persamaan $\phi = \frac{\varepsilon_c}{k d}$. Karena adanya sifat non-linier dari hubungan konstitutif beton, maka prosedur *trial and error* harus digunakan pada persamaan ini. Perlu diingat bahwa pada

Gambar (4.20b) berlaku persamaan $k_t d = \frac{2}{3} (h - kd)$, karena variasi linier dari tegangan tarik beton.

Prosedur penyelesaian persamaan adalah sebagai berikut: (1) tentukan ε_{c1} ; (2) tentukan kd ; (3) hitung F_c , F_{ct} , f_{st} , dan $k_c d$; (4) Periksa apakah persamaan (4-2) memenuhi toleransi pemilihan awal. Jika tidak, ubah nilai kd dan kembali ke langkah (3). Jika terpenuhi lanjutkan ke langkah (5) periksa apakah persamaan (4-3) memenuhi toleransi pemilihan awal.

Jika tidak, ganti nilai ε_{c1} dan kembali ke langkah (2). Jika terpenuhi, selanjutnya gunakan nilai ε_{c1} dan kd , dan nilai F_c , F_{ct} , f_{st} , $k_c d$ dan $k_t d$ dapat diterima.

4.3.3 Gaya dalam dan momen pada saat terjadi retak (M_{cr})



Gambar 4. 21 Distribusi tegangan - regangan penampang retak pelat. (a) Penampang retak pelat; (b) distribusi tegangan-regangan pada penampang Y-Y

Penampang retak pelat dan distribusi tegangan regangan yang terkait diperlihatkan pada Gambar 4.21. Pada saat terjadi retak pertama, regangan tarik maksimum ε_{c2} dapat diketahui, dan dihitung menggunakan persamaan.

$$\varepsilon_{c2} = \frac{f_r}{E_{ct}} \quad (4-9)$$

dengan f_r adalah tegangan lentur HPFRC yang ditentukan dari pengujian balok lentur atau berdasarkan ACI 363R-92 (1997):

$$f_r = 0,94 \sqrt{f'_c} \text{ MPa} \quad \text{untuk } 21 \text{ MPa} < f'_c < 88 \text{ MPa} \quad (4-10)$$

dengan f'_c adalah kuat tekan beton karakteristik dalam MPa.

Ketebalan daerah tekan kd dapat dihitung untuk nilai ε_{c1} yang terpilih mempergunakan persamaan.

$$kd = \left[\frac{\varepsilon_{c1}}{\varepsilon_{c1} + \varepsilon_{c2}} \right] h \quad (4-11)$$

Momen retak dihitung dengan persamaan:

$$M_{cr} = F_c k_c d + F_{ct} y_t + A_s f_{st} (d - kd) \quad (4-12)$$

4.3.4 Gaya dalam pada penampang setelah retak pertama

Sesudah retak, momen lentur yang diaplikasikan pada penampang Gambar 4.21a bernilai lebih besar atau sama dengan yang terjadi pada momen retak pelat ($M \geq M_{cr}$).

Distribusi regangan diasumsikan linier sepanjang ketebalan pelat, seperti pada kasus penampang tidak retak. Gaya yang bekerja pada penampang diganti batas atasnya dari $y_t = h - x$ menjadi $y_t = \frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_c} \cdot kd$, sehingga persamaan (4-7) menjadi:

$$F_{ct} = \int_{y_t=0}^{y_t=\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_c} \cdot kd} b \left(E_{ct} \frac{\varepsilon_{c1}}{kd} y_t \right) dy_t \quad (4-13)$$

Perhitungan distribusi tegangan beton pada penampang retak selalu terkait dengan tegangan baja, dan hanya kondisi kesetimbangan translasi saja yang perlu dipenuhi. Jika tegangan baja f_{st} ditentukan kenaikannya, momen lentur pada penampang akan terdefiniskan. Untuk menentukan gaya yang bekerja pada penampang, nilai coba-coba dipilih untuk ketebalan daerah tekan kd dan regangan beton ε_{c1} dihitung menggunakan persamaan (4-8) yang dimodifikasi untuk tegangan baja f_{st} menjadi:

$$\varepsilon_{c1} = \left[\frac{kd}{d-kd} \right] \frac{f_{st}}{E_s} \quad (4-14)$$

4.3.5 Gaya dalam pada penampang paska baja tulangan leleh

Sesudah tulangan baja mencapai kuat lelehnya f_y , maka perhitungan selanjutnya paska beban layan dilakukan dengan melakukan perubahan pada nilai ε_{c1} kembali dengan mempergunakan nilai tegangan tarik baja sebesar nilai ($f_{st} = f_y$). Analisis dilakukan hingga nilai tegangan tekan beton pada sisi ekstrim tekan $\Phi(\varepsilon(y))$ mencapai nilai kuat tekan f'_c .

4.3.6 Gaya dalam pada penampang paska kuat tekan beton terlampaui

Sesudah nilai tegangan tekan beton pada sisi ekstrim tekan $\Phi(\varepsilon(y))$ mencapai nilai kuat tekan f'_c , maka analisis gaya-gaya dalam pada penampang pelat dilakukan dengan mengubah nilai regangan ε_{c1} hingga tercapai nilai $\varepsilon_{c1} = 0,0038$. Beton mempergunakan nilai kuat tekan $\Phi(\varepsilon(y))$ sesuai persamaan (4-1b) $\Phi(\varepsilon_c) = f'_c - 0,83f'_c(\varepsilon_c - \varepsilon_0)$ dan baja menggunakan nilai kuat tarik leleh baja ($f_{st} = f_y$).

4.4 Analisis Pelat Menggunakan Metode Elemen Hingga

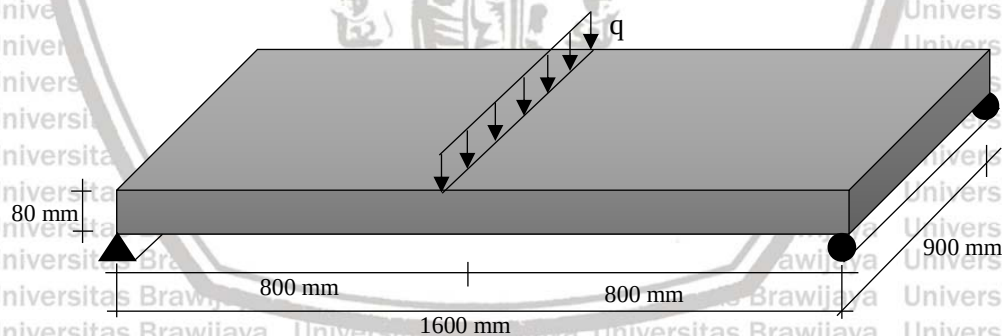
Pelat adalah elemen struktur datar yang ketebalannya kecil dibandingkan dengan dimensi permukaannya. Ketebalan pelat biasanya konstan dan diukur tegak lurus ke bidang tengah pelat. Pelat yang mengalami pembebanan lateral biasanya diselesaikan dengan

menggunakan teori lentur pelat yang mengacu pada defleksi tegak lurus terhadap bidang tengah pelat akibat gaya luar. Tiga asumsi sebagai dasar Teori Plat Klasik atau Teori Plat Kirchhoff adalah:

1. Bidang tengah pelat tetap bebas dari tegangan / regangan searah bidang.
2. Elemen garis tegak lurus terhadap permukaan tengah pelat tetap tegak lurus selama deformasi.
3. Elemen garis yang tegak lurus terhadap permukaan tengah tidak berubah panjangnya selama deformasi.

Idealnya, kekakuan elemen EI dan GJ harus merefleksikan derajat retak dan aksi inelastik yang terjadi pada setiap elemen sebelum leleh. Namun, kompleksitas yang terjadi dalam pemilihan kekakuan yang berbeda untuk seluruh elemen suatu struktur dapat menyebabkan ketidakefisienan analisis dalam proses desain (ACI 318M-14, 2014:68).

Analisis lentur pelat dilaksanakan dengan Metode Elemen Hingga Isoparametrik 2-D, dengan pendekatan sesuai dengan kondisi tegangan bidang dan pengaruh retak pada beton. Bahan pelat HPFRC dimodelkan sebagai elemen segiempat isoparametrik dua dimensi pada kondisi plane-stress. Dalam hubungan konstitutif berikut, untuk analisis elemen hingga digunakan metode penyelesaian masalah dengan teori *Plane Stress* dan teori *Reisner Mindlin*. Analisis menggunakan sebuah model pelat beton kinerja tinggi HPFRC dengan panjang bentang 1600 mm dan lebar 900 mm seperti ditunjukkan pada Gambar. 4.22.

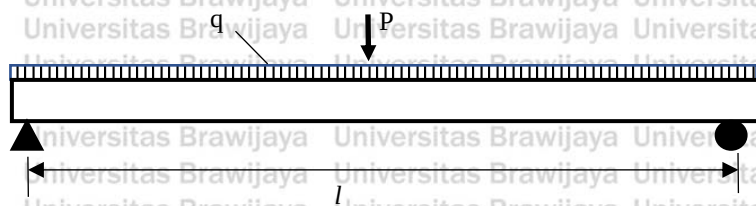


Gambar 4. 22 Geometri, pembebanan, dan tumpuan model Pelat HPFRC.

Pelat HPFRC satu-arah dengan beban di tengah bentang pada Gambar 4.23 akan melengkung tegak lurus terhadap sumbu longitudinalnya. Beban eksternal berupa beban lateral akan diubah menjadi momen internal yang menimbulkan gaya tarik di sisi bawah pelat dan gaya tekan pada sisi atas pelat. Momen maksimum akibat beban layan M (kN-m) pada tahap defleksi dihitung oleh persamaan:

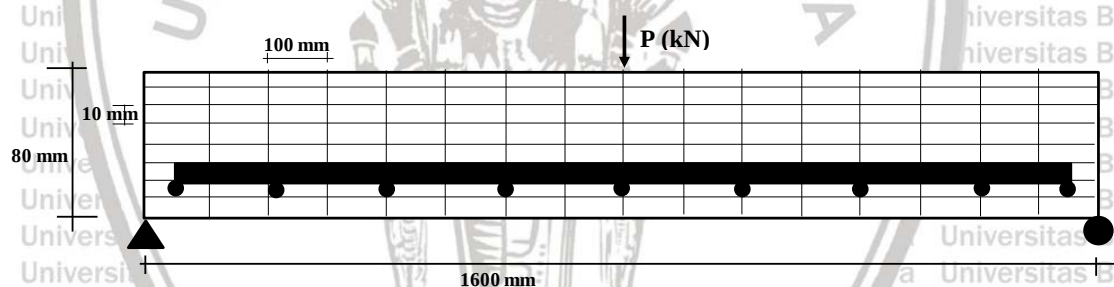
$$M = \frac{1}{4} P \cdot l + \frac{1}{8} q l^2 \quad (4-15)$$

dengan P adalah beban garis terpusat dan beban seragam q akibat berat pelat HPFRC dan l adalah panjang bentang pelat HPFRC.



Gambar 4. 23 Beban eksternal pada pelat HPFRC satu arah

Ketebalan pelat HPFRC adalah 80 mm. Dalam model ini, beban meningkat secara simultan dengan kontrol perpindahan pada titik pemuatan. FEM yang dikembangkan dijalankan untuk data yang sama. Dalam model elemen 2D-isoparametrik dari FEM, penampang pelat HPFRC digabungkan menjadi 128 elemen isoparametrik HPFRC: 16 ke arah sumbu X, 8 ke arah sumbu Y. Setiap 16 elemen ke arah sumbu X dikelompokkan sebagai lapisan 1 mesh. Konfigurasi mesh untuk elemen isoparametrik 2 dimensi pelat HPFRC ditunjukkan pada Gambar 4.24 dan defleksi beban dihitung pada tengah bentang. Program yang dikembangkan pada analisis penelitian ini ditulis dengan program *Fortran 90*.



Gambar 4. 24 Idealisasi Elemen Hingga Pelat HPFRC

Modulus elastisitas E untuk setiap layer dihitung sesuai dengan kondisi bahannya, apakah sebagai bahan komposit dengan baja ataupun hanya beton saja. Bagi lapisan atau layer yang terdiri dari beton dan baja dihitung mengikuti persamaan (Avram, Faccaoru, Filimon, Mirsu, & Terteu, 1981):

$$E_e = E_s \cdot V_s + E_c \cdot V_c \quad (4-16)$$

Dengan E_e = modulus elastisitas ekuivalen pelat HPFRC, E_s = Modulus Elastisitas baja tulangan, E_c = Modulus elastisitas HPFRC, V_s = volume relatif baja pada layer yang dihitung, V_c = volume relatif HPFRC pada layer yang dihitung.

Tegangan bidang didefinisikan sebagai keadaan tegangan dimana tegangan normal pada bidang x-y yaitu σ_x dan tegangan geser τ_{xz} dan τ_{yz} diasumsikan nol. Pelat beton serat kinerja

tinggi diperlakukan sebagai pelat berlapis dan tegangan utama dihitung untuk setiap lapisan pada seluruh pelat.

Untuk kombinasi tegangan didalam permukaan leleh awal, bahan HPFRC diasumsikan sebagai bahan linier isotropik yang homogen. Diasumsikan bahwa perilaku elemen ini dapat digambarkan dengan metode tegangan bidang. Hubungan tegangan-regangan untuk masalah tegangan bidang memiliki bentuk:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4-17)$$

dimana E adalah modulus elastisitas HPFRC dan ν adalah Poisson's ratio.

Hubungan tegangan utama dalam dua dimensi adalah:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} = \sigma_{max} \quad (4-18)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} = \sigma_{min} \quad (4-19)$$

Penyelesaian umum masalah kontinum dengan metode elemen hingga selalu mengikuti proses langkah-demi-langkah yang teratur. Dengan mengacu pada masalah statika struktur, prosedurnya adalah: 1) Struktur dibagi menjadi elemen-elemen diskrit (diskritisasi); 2) Pilih interpolasi atau model perpindahan yang tepat; 3) Turunkan matriks elemen kekakuan dan vektor beban; 4) Merakit persamaan elemen untuk mendapatkan keseluruhan persamaan keseimbangan; 5) Selesaikan untuk nodal perpindahan yang tidak diketahui; 6) Hitunglah tegangan dan regangan elemen. FEM yang dikembangkan dijalankan untuk data yang identik.

Analisis keretakan melibatkan prosedur iterasi dimana pelat awalnya dianggap tidak retak, dalam hal ini, $\delta = \alpha_x = \alpha_y = \alpha_1 = 1$. Pada tahap berikutnya dengan mengikuti prosedur iterasi, tegangan utama (*principal stresses*) σ_1 dan σ_2 selanjutnya dihitung untuk setiap lapisan menggunakan konstanta elastis yang dikaitkan dengan δ yang diperoleh dalam siklus sebelumnya. Tegangan utama dibandingkan dengan tegangan tarik batas σ_{Ti} sesuai dengan $\delta = i$. Jika tegangan tarik batas dilampaui oleh σ_1 dan σ_2 , konstanta elastik pada wilayah tarik dimodifikasi untuk menyesuaikan dengan cabang diagram berikutnya yang lebih rendah. Konstanta elastik untuk arah x dan y hanya dimodifikasi jika tegangan normal yang sesuai adalah tarik. Variabel ulangan yang ditetapkan sama dengan nol pada awal setiap siklus diatur sama dengan 1 yang menandakan bahwa siklus iterasi lain akan diperlukan untuk

konstanta elastis baru. Untuk setiap siklus iterasi, konstanta elastis diperiksa pada setiap lapisan elemen. Konfigurasi retak dianggap dicapai bila tidak terjadi modifikasi lebih lanjut dari konstanta elastis. Selanjutnya, diagram hubungan beban-defleksi masing-masing benda uji pelat disusun.

4.5 Tegangan Lekat (*Bond Stress*)

4.5.1 Tegangan lekat (*bond stress*) dekat retak lentur pertama

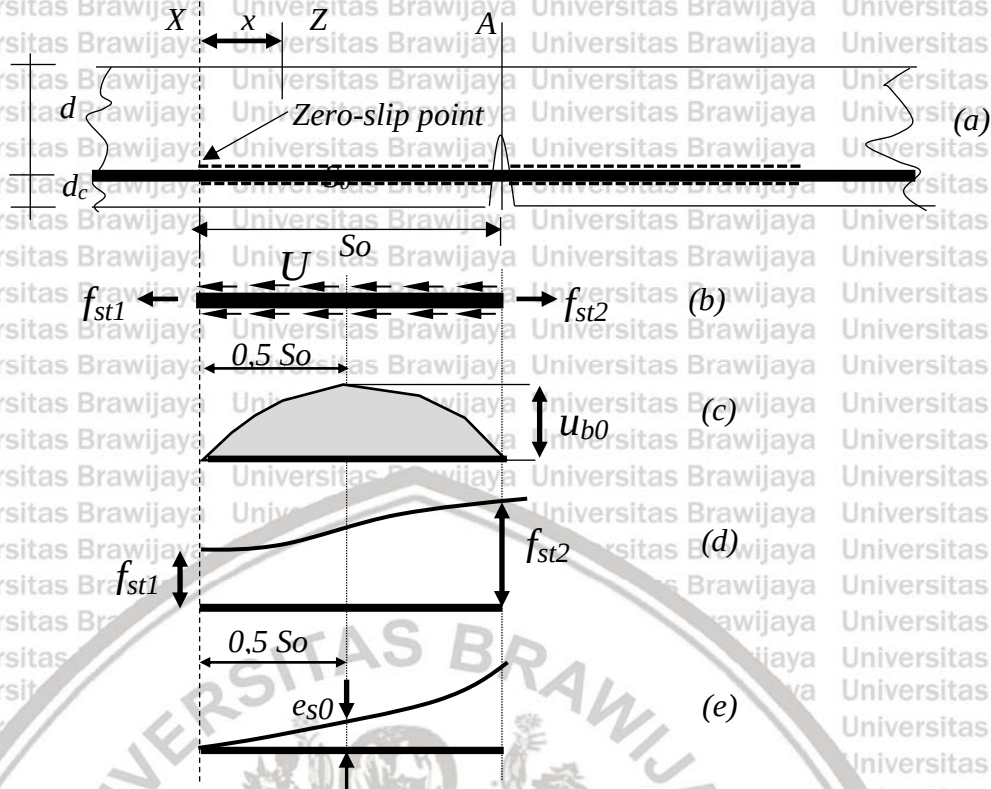
Saat terjadi retak lentur pertama pada pelat yang dibebani, tegangan baja pada penampang retak meningkat karena tegangan tarik yang ditahan beton ditransfer ke batang baja. Kenaikan tegangan baja ini ditahan oleh gaya lekatan (*bond forces*) yang terjadi sepanjang batang baja yang ada pada kedua sisi retakan. Gaya lekatan ini berasosiasi dengan slip lekatan (*bond slip*), dan panjang *bond slip* tergantung pada kenaikan tegangan baja sebagaimana hubungan *bond stress-bond slip* dan diameter tulangan.

Gambar 4.25(a) menunjukkan bagian pelat segera setelah retak lentur pertama terjadi pada penampang A. Kenaikan tegangan baja akibat retak terjadi dalam bentuk slip sepanjang S_o . Jarak S_o disebut sebagai panjang slip. Tegangan tarik f_s pada kedua ujung batang antara penampang retak dan ujung panjang slip, bersama-sama dengan gaya lekat (U) ditunjukkan pada Gambar 4.25(b). Variasi tegangan lekat (u) dan tegangan baja (f_{st}) pada panjang slip, dan pertambahan panjang batang baja diukur dari ujung panjang slip dapat dilihat pada Gambar 4.25(c) hingga 4.25(e).

Kondisi tegangan-regangan pada penampang yang tidak ada slip (di luar jarak S_o dari retak yang terjadi) diasumsikan tidak berubah karena terjadinya retakan pertama. Konsekuensinya, tegangan baja f_{s1} pada penampang X (ujung panjang slip) dapat dihitung menggunakan prosedur penampang tidak retak. Tegangan baja f_{s2} pada penampang retak A dievaluasi sebagaimana mengevaluasi Gambar 4.25. Sesudah menghitung nilai f_{st1} dan f_{st2} , maka panjang slip S_o dan tegangan lekat puncak u_{bo} ditentukan mengikuti dua persamaan (4-20) dan (4-21) secara simultan.

Kondisi kesetimbangan gaya yang bekerja pada bagian batang baja antara penampang retak dan zero-slip point (antara penampang A dan X pada Gambar 4.25(b)) adalah:

$$\frac{\pi \phi^2}{4} (f_{s2} - f_{s1}) = \frac{2}{3} \pi \phi u_{bo} S_o \quad (4-20)$$



Gambar 4. 25 Retak lentur pertama pelat; (a) Geometri retak pelat; (b) gaya lekat (*bond force*) pada batang baja; (c) Tegangan lekat u (*bond stress*) pada panjang slip (*the slip length*); (d) Tegangan batang baja pada panjang slip; (e) Penambahan panjang batang baja.
Sumber: (Piyasena, 2002)

Puncak tegangan lekat (u) dan slip local s_o pada titik tersebut harus memenuhi hubungan konstitutif

$$u_{bo} = \Phi'(s_o) \quad (4-21)$$

Dengan $\Phi'(s_o)$ adalah hubungan konstitutive yang diberikan oleh persamaan

$$\frac{u_b}{\sqrt{f'_c}} = 150 s \quad \text{jika } s \leq 0,004 \quad (4-22a)$$

$$\frac{u_b}{\sqrt{f'_c}} = 0,47 + 33 s \quad \text{jika } 0,004 < s \leq 0,010 \quad (4-22b)$$

$$\frac{u_b}{\sqrt{f'_c}} = 0,71 + 9 s \quad \text{jika } s > 0,010 \quad (4-22c)$$

Dengan kuat lekat (*bond stress*) u_b dan kuat tekan beton (*concrete strength*) f'_c dalam satuan MPa dan slip s dalam satuan mm. Slip s_o pada titik di mana u_{bo} terjadi (pada jarak $0,5 S_o$ dari *zero-slip point*) dapat dihitung sebagai

$$S_o = e_{so} - e_{co} \quad (4-23)$$

dengan e_{so} dan e_{co} adalah perpanjangan baja dan beton, pada jarak $0,5 S_o$ dari posisi garis X (zero-slip point). Kedua perpanjangan tersebut diukur menggunakan titik referensi yang sama pada posisi garis X . Perpanjangan elastis baja e_{so} , dihitung dengan mengintegrasikan fungsi regangan sebagaimana tegangan baja bervariasi secara non-linier mengikuti distribusi tegangan lekat yang berbentuk parabola.

Tegangan lekat u_{bo} pada jarak x dari penampang zero-slip (penampang Z dalam Gambar 4.25) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan

$$u_{bx} = 4 u_{bo} \frac{x}{s_o} \left(1 - \frac{x}{s_o}\right) \quad (x \leq S_o) \quad (4-24)$$

Total gaya lekat U_{bx} yang bekerja pada permukaan batang antara penampang X dan Z dalam Gambar 4.25 dapat dihitung dengan integral berikut:

$$U_{bx} = \int \pi \phi u_{bx} dx = \frac{4 u_{bx} \pi \phi}{s_o} \left(\frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3s_o}\right) \quad (x \leq S_o) \quad (4-25)$$

Tegangan baja yang dihasilkan f_{sx} pada penampang Z dapat dihitung menggunakan persamaan yang dijabarkan dengan menyamakan perbedaan pada gaya-gaya tarik yang bekerja pada batang baja pada penampang X dan Z , dan total gaya lekat yang bekerja pada permukaan batang baja antara kedua penampang tersebut.

$$\frac{\pi \phi^2}{4} (f_{stx} - f_{st1}) = U_{bx} \quad (4-26)$$

Substitusi persamaan (4-26) ke dalam persamaan (4-25) memunculkan persamaan untuk f_{sx} :

$$f_{stx} = f_{st1} + \frac{16 u_{bo}}{s_o \phi} \left(\frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3s_o}\right) \quad (x \leq S_o) \quad (4-27)$$

Hubungan regangan baja ε_{sx} pada penampang Z selanjutnya dihitung sebagai $\varepsilon_{sx} = f_{sx}/E_s$.

Perpanjangan batang baja e_{so} yang dihasilkan pada jarak $0,5 S_o$ dari zero-slip section dihitung dengan mengintegrasikan fungsi regangan baja ε_{sx} berikut.

$$\begin{aligned} e_{so} &= \int_{x=0}^{x=0,5S_o} \varepsilon_{sx} dx \\ e_{so} &= \int_{x=0}^{x=0,5S_o} \left\{ \frac{f_{st1}}{E_s} + \frac{16 u_{bo}}{s_o \phi E_s} \left(\frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3s_o}\right) \right\} dx \\ e_{so} &= \frac{f_{st1} S_o}{2 E_s} + \frac{u_{bo} S_o^2}{4 E_s \phi} \end{aligned} \quad (4-28)$$

Dalam menghitung e_{so} , penggunaan f_{s2} (tegangan baja pada penampang retak) dianggap lebih tepat daripada penggunaan f_{s1} (tegangan baja pada penampang zero-slip), karena jarak retak dan lebar retak biasanya dinyatakan sebagai fungsi dari f_{s2} . Karena itu, variable f_{s1} dalam persamaan (4-20) diganti dengan f_{s2} menggunakan hubungan berikut, dimana diturunkan dengan mengatur ulang persamaan (4-27).

$$f_{st1} = f_{st2} - \frac{8 u_{bo} S_o}{3 \phi} \quad (4-29)$$

Substitusi persamaan (4-29) ke dalam persamaan (4-28) menghasilkan persamaan untuk menghitung e_{so} .

$$e_{so} = \frac{f_{st2} S_o}{2 E_s} - \frac{13 u_{bo} S_o^2}{12 E_s \phi} \quad (4-30)$$

Dalam menghitung slip s_o , perpanjangan beton e_{co} ditentukan terkait dengan gaya tekan $e_{c,co}$ dan gaya lekat $e_{c,bo}$ di tengah antara penampang zero slip dan penampang retak menggunakan persamaan (4-28) hingga (4-30).

$$1000 e_{c,co} = \left(2,5 \frac{S_o}{d} + 0,5 \right) \frac{a}{100} \geq 0 \quad (4-31)$$

$$1000 e_{c,bo} = \left(1,3 \frac{S_o}{d} - 0,5 \right) \left(\frac{S_o}{100} \right) u_{bo} \left(\frac{4 \rho d}{\phi} \right) \geq 0 \quad (4-32)$$

dengan $\rho = \frac{A_{st}}{bd}$.

$$e_{co} = e_{c,co} + e_{c,bo} \quad (4-33)$$

Prosedur penyelesaian u_{bo} dan S_o menggunakan cara coba-coba karena sifat alami non-linier dari hubungan konstitutive $u_{bo} = \Phi'(s_o)$, adalah sebagai berikut: (1) tentukan nilai u_{bo} ; (2) Hitung S_o menggunakan persamaan (4-20); (3) tentukan s_o menggunakan persamaan (4-23), persamaan (4-30) bersama dengan persamaan (4-31) hingga (4-32); (4) Hitung u_{bo} menggunakan persamaan (4-21). Periksa apakah hasilnya sesuai.

4.5.2 Tegangan lekat dengan bidang momen simetris

Gambar 4.26 memperlihatkan retak yang terjadi pada penampang 1 dan 2 dengan bidang momen konstan sehingga panjang slipnya saling overlap. Ini terjadi jika jarak retak S lebih kecil dari $2 S_o$. Tegangan tarik di kedua penampang sama karena momen lenturnya sama. Demikian juga dengan tegangan dan regangan blok beton antara kedua retak simetris terhadap penampang C. Slip dan tegangan lekat pada tengah bentang juga nol.

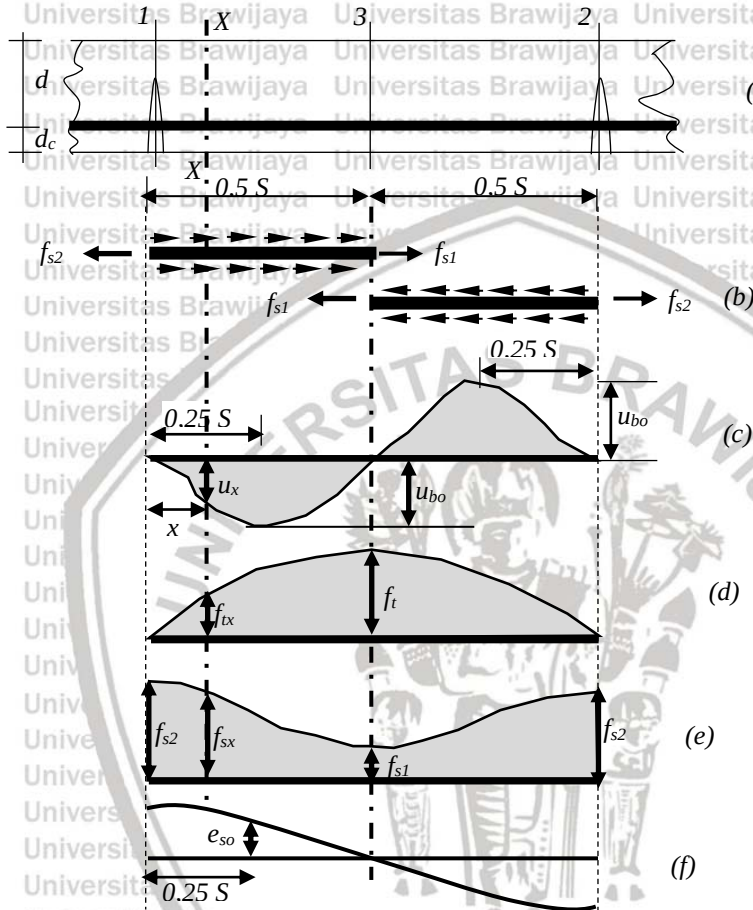
Puncak tegangan lekat u_{bo} dan slip s_o pada jarak $0,25S$ dari penampang retak dihitung menggunakan persamaan (4-34). Prosedur penyelesaiannya adalah: (1) pilih nilai u_{bo} ; (2) Hitung s_o menggunakan persamaan (4-23) $s_o = e_{so} - e_{co}$ dan persamaan (4-30) dengan mengganti S_o menjadi $0,5S$, sehingga persamaan menjadi

$$e_{so} = \frac{f_{s2} S_o}{4 E_s} - \frac{13 u_{bo} S_o^2}{49 E_s \phi} \quad (4-34)$$

bersamaan dengan persamaan 4.31 hingga 4.33; (3) Hitung u_{bo} menggunakan persamaan (4-21) $u_{bo} = \Phi'(s_o)$. Jika perbedaan antara u_{bo} hasil perhitungan dan nilai u_{bo} yang dipilih kurang dari toleransi yang ditentukan, maka nilai u_{bo} dapat diterima. Jika tidak, pilih nilai u_{bo} yang lain.

Sesudah u_{bo} ditentukan, maka tegangan baja f_{s1} pada zero-slip section (penampang 3) dapat dihitung menggunakan persamaan (4-29) dengan variable S_o diganti dengan $0,5S$ sehingga persamaan menjadi

$$f_{s1} = f_{s2} - \frac{4 u_{bo} S}{3 \phi} \quad (4-35)$$



Gambar 4. 26 Distribusi tegangan memanjang pada segmen retak lentur: (a) Geometri perambatan retak; (b) Tegangan lekat u (bond stress); (c) Tegangan tarik memanjang pada pelat beton f_t ; (d) Tegangan tarik memanjang pada baja f_s ; (f) perpanjangan tulangan diukur dari bidang tengah segmen retak.

Sumber: Nawy (1990), Soehardjono (2004), Piyasena (2002)

4.5.3 Tegangan lekat dengan bidang momen yang berbeda.

Distribusi tegangan lekat dan tegangan baja, slip dan perpanjangan batang baja antara dua retakan dengan bidang momen yang bervariasi agak berbeda dibanding dengan yang diuraikan untuk momen simetris. Ini karena momen lentur pada kedua penampang retak berbeda, dan konsekuensinya, bidang tegangan dan regangan pada blok beton antara kedua retakan tidak simetris terhadap sisi tengahnya. Zero-slip point tidak akan terletak pada tengah bentang.

Gambar 4.27 memperlihatkan distribusi tegangan lekat dan tegangan baja antara dua retakan dengan bidang momen yang berbeda akibat beban pelat yang bekerja. Jarak antara retakan adalah S , dan penampang *zero-slip* terletak pada jarak sejauh S_x dari retakan yang memiliki momen lentur lebih kecil. Tegangan baja pada kedua penampang yang retak adalah f_{s2} dan f_{s3} sementara pada penampang *zero-slip* adalah f_{s1} ($f_{s1} < f_{s2} < f_{s3}$). Puncak tegangan lekat pada kedua sisi adalah u_{bo} dan u'_{bo} . Untuk menentukan lokasi penampang *zero-slip*, tegangan lekat puncak yang dihasilkan, dan tegangan baja minimum f_{s1} , persamaan berikut dijabarkan.

Hubungan konstitutif untuk tegangan lekat puncak akan dapat dipenuhi dari persamaan:

$$u_{bo} = \Phi'(s_o) \quad (4-36)$$

$$u'_{bo} = \Phi'(s'_o)$$

dengan $\Phi'(s_o)$ adalah hubungan konstitutif dalam persamaan (4-21). s_o dan s'_o adalah slip pada lokasi dimana puncak tegangan lekat terjadi. $S_y = S - S_x$. Slip s_o dan s'_o dihitung sebagai perbedaan relatif perpanjangan elastis baja dan beton di sekitarnya dengan persamaan:

$$s_o = e_{so} - e_{co} \quad (4-37a)$$

$$s'_o = e'_{so} - e'_{co} \quad (4-37b)$$

dengan e_{so} dan e_{co} adalah perpanjangan baja dan beton, pada lokasi tegangan lekat puncak u_{bo} terjadi. e'_{so} dan e'_{co} adalah nilai perpanjangan pada saat tegangan lekat u'_{bo} terjadi.

Semua perpanjangan diukur dari lokasi *zero-slip point* pada penampang 3. Perpanjangan baja dihitung dengan persamaan:

$$e_{so} = \frac{f_{s2} S_x}{4 E_s} - \frac{13 u_{bo} S_x^2}{48 E_s \phi} \quad (4-38a)$$

$$e'_{so} = \frac{f_{s3} S_y}{4 E_s} - \frac{13 u'_{bo} S_y^2}{48 E_s \phi} \quad (4-38b)$$

Perpanjangan beton e_{co} dan ditentukan terkait dengan gaya tekan $e_{c,co}$ dan gaya lekat $e_{c,bo}$ di tengah antara penampang *zero slip* dan penampang retak menggunakan persamaan (4-31) hingga (4-33).

$$1000 e_{c,co} = \left(2,5 \frac{S_x}{d} + 0,5 \right) \frac{a}{100} \geq 0 \quad (4-39a)$$

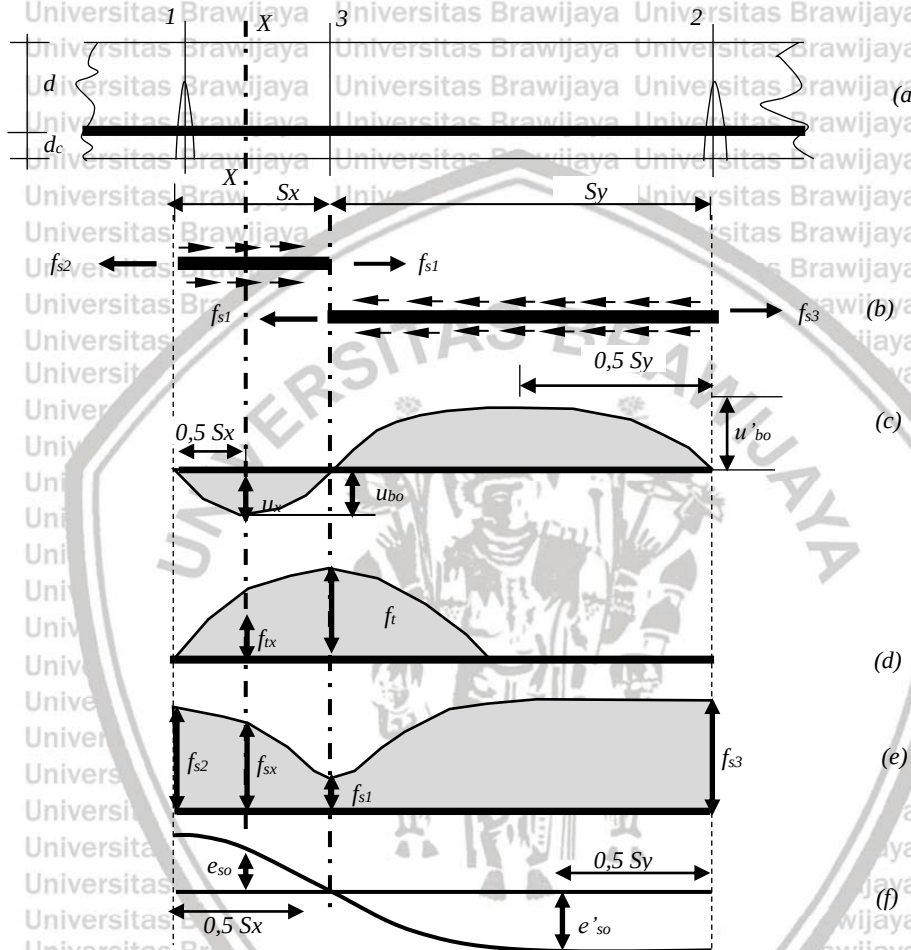
$$1000 e'_{c,co} = \left(2,5 \frac{S_y}{d} + 0,5 \right) \frac{a}{100} \geq 0 \quad (4-39b)$$

$$1000e_{c,bo} = \left(1,3 \frac{S_x}{d} - 0,5\right) \left(\frac{S_x}{100}\right) u_{bo} \left(\frac{4\rho d}{\phi}\right) \geq 0 \quad (4-39a)$$

$$1000e'_{c,bo} = \left(1,3 \frac{S_y}{d} - 0,5\right) \left(\frac{S_y}{100}\right) u'_{bo} \left(\frac{4\rho d}{\phi}\right) \geq 0 \quad (4-39b)$$

$$e_{co} = e_{c,co} + e_{c,bo} \quad (4-40a)$$

$$e'_{co} = e'_{c,co} + e'_{c,bo} \quad (4-40b)$$



Gambar 4. 27 Distribusi tegangan memanjang pada segmen retak lentur dengan variasi bidang momen: (a) Geometri perambatan retak; (b) Gaya lekat U (*bond force*) yang bekerja pada tulangan; (c) Tegangan lekat u (*bond stress*) (d) Tegangan tarik memanjang pada segmen beton f_t ; (e) Tegangan tarik memanjang pada baja f_s ; (f) perpanjangan tulangan diukur dari bidang tengah segmen retak.

Sumber: Nawy (1990), Soehardjono (2004), Piyasena (2002)

Persamaan akhir dijabarkan dengan mempertimbangkan kesetimbangan dua bagian batang baja di antara masing penampang retak dan zero-slip point.

$$f_{s1(1)} = f_{s2} - \frac{8 u_{bo} S_x}{3\phi} \quad (4-41a)$$

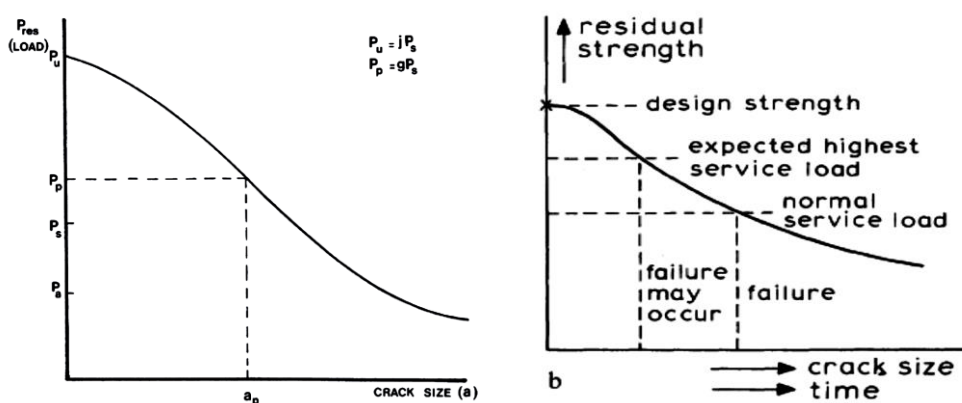
dan

$$f_{s1(2)} = f_{s3} - \frac{8u'_{bo}S_x}{3\phi} \quad (4-41b)$$

Proses perhitungannya adalah: (1) tentukan nilai coba-coba S_x ; (2) pilih nilai coba-coba u_{bo} ; (3) hitung s_o menggunakan persamaan (4-39a) dan (4-38a) bersama dengan persamaan (4-39) hingga (4-41); (4) substitusi nilai s_o ke dalam persamaan (4-36) dan tentukan nilai baru untuk u_{bo} . Periksa kesesuaiannya; (5) pilih nilai coba-coba u'_{bo} ; (6) hitung s'_o dan tentukan nilai baru untuk u'_{bo} . Periksa kesesuaiannya; (7) hitung $f_{s1(1)}$ dan $f_{s1(2)}$ menggunakan persamaan (4-41a) dan (4-41b); (9) jika nilai $f_{s1(1)} = f_{s1(2)}$, maka pilihan nilai S_x , dan nilai u_{bo} , u'_{bo} serta f_{s1} telah sesuai. Jika tidak, ganti nilai S_x dan kembali ke langkah (2).

4.6 Prediksi Retak dengan Metode *Linear Elastic Fracture Mechanics*

Proses fraktur pada awalnya lambat dan stabil, selanjutnya retakan akan bertambah panjang akibat fraktur, tetapi strukturnya masih menggantung bersama. Pada akhirnya, fraktur akan menjadi tidak stabil dan struktur mengalami pecah menjadi dua atau lebih. Seluruh proses fraktur dari stabil menjadi tidak stabil dapat terjadi dalam beberapa detik. Jika beban $P = P_{res}$ tidak terjadi, selama bekerjanya beban layan pada level beban P_{res} atau di bawahnya, retak akan tetap tumbuh seiring waktu bukan karena fraktur, tetapi sebagai akibat mekanisme retak seperti kelelahan, tegangan-korosi atau rangkak. Kekuatan struktur akan menurun menurun akibat retak dan nilai kekuatannya lebih rendah dari kuat awal yang dirancang untuk struktur tersebut. Kuat residu struktur akan menurun secara progresif sesuai dengan meningkatnya ukuran retak (Gambar 4.28).



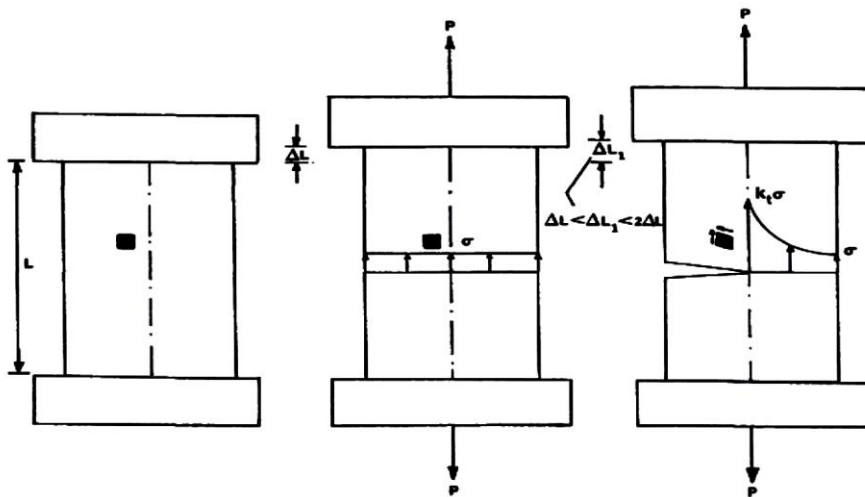
Gambar 4. 28 Masalah retak pada struktur, (a) Diagram kuat residu dinyatakan sebagai beban residu atau P_{res} ; (b) kurva kuat residu terkait waktu dan ukuran retak.

Sumber: (Broek, 1982) dan (Broek, 1989)

4.6.1 Faktor konsentrasi tegangan

Diskontinuitas (keadaan yang terputus-putus), *fillet* (pemisahan), takik (torehan), dan retak, menimbulkan konsentrasi tegangan, yaitu daerah lokal di mana tegangannya lebih tinggi daripada tegangan nominal atau tegangan rata-rata.

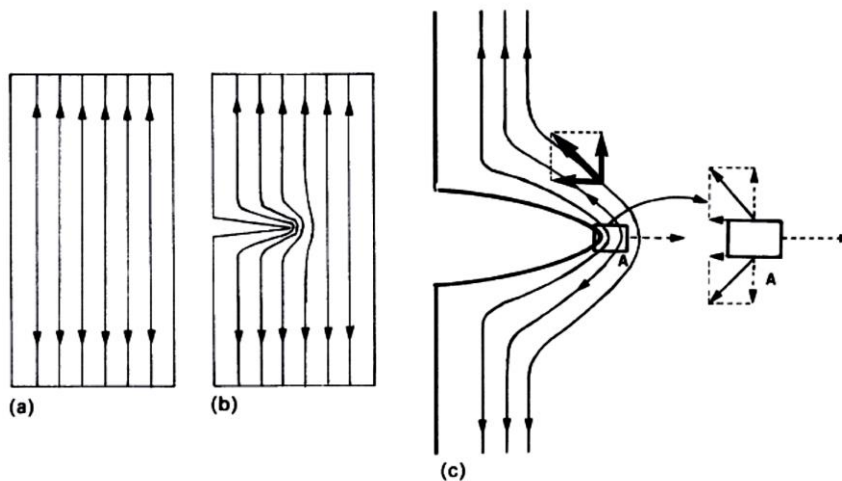
Dua batang dengan ukuran dan bahan yang sama disatukan seperti pada Gambar 4.29. Pada kondisi utuh, tiap batang menahan setengah total beban, sehingga regangannya sama, dan menyebabkan elongasi ΔL . Jika batang kiri dipotong, terjadi perubahan tegangan, regangan, dan perpanjangan. Jika bagian atas batang kanan mengalami regangan, setengah bagian atas batang kiri tentu mengalami regangan yang sama. Karena modulus elastisitas kedua batang sama (E), maka regangan yang sama menyebabkan tegangan yang sama ($\sigma = \epsilon E$). Dengan demikian, setiap batang menahan tegangan dan setengah beban yang sama. Namun bilah kanan harus menahan semua beban pada bagian potongan karena bilah kiri dipotong. Di bawah potongan, kedua batang dilekatkan kembali dan mengalami regangan yang sama. Akibatnya bagian bawah batang akan membagi beban secara bersama. Tegangan nominal pada batang kanan tepat pada posisi potongan adalah P/A , namun tegangan yang lebih tinggi akan terjadi dekat dengan ujung potongan batang yang kiri. Hal ini disebut sebagai konsentrasi tegangan pada potongan tersebut.



Gambar 4. 29 Efek pemotongan salah satu dari dua batang yang di las

Sumber: (Broek, 1989)

Jalur *load-path* (*load-flow*) adalah garis imajiner yang mengindikasikan bagaimana satu unit beban ditransfer dari satu titik pembebanan ke titik yang lain. Untuk beban seragam, garis aliran lurus dan berjarak sama, artinya beban didistribusikan secara merata (tegangan seragam). Jika jalur beban terganggu oleh pemotongan, garis aliran akan mengelilingi retakan ini dalam jarak pendek seperti pada Gambar 4.30.



Gambar 4. 30 Garis aliran beban
Sumber: (Broek, 1989)

Tampak arah beban di sekitar takik tidak sama seperti pada bagian yang dibebani secara seragam: tegangan lokal memiliki komponen vertikal maupun horizontal, dan tegangan di daerah yang memotong bidang, tegangannya biaksial (σ_y dan σ_x) sementara beban yang bekerja adalah uniaksial. Dengan tidak adanya pemangkasan, medan tegangan seragam, keadaan tegangan tidak koaksial. Karena retakan/takikan, medan tegangan biaksial berkembang secara lokal. Tidak hanya celah yang menyebabkan konsentrasi tegangan, itu juga menimbulkan tegangan transversal.

Tegangan lokal maksimum pada ujung retakan tersebut dapat dihitung dengan persamaan:

$$\sigma_m = \sigma_0 \left[1 + 2 \sqrt{\left(\frac{a}{\rho} \right)} \right] \quad (4-42)$$

dengan σ_m = pembesaran tegangan nominal, $\rho = R$ = radius lengkungan, dan a = tinggi retak atau $\frac{1}{2}$ tinggi retak internal dan diinterpretasikan sebagai dimensi geometri yang relevan.

Rasio antara σ_m / σ_0 disebut faktor konsentrasi tegangan. Faktor konsentrasi tegangan untuk banyak bentuk retakan dapat dihitung dengan mempergunakan persamaan umum:

$$k_t = 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (4-43)$$

Persamaan ini menunjukkan besar pengaruh dari akar radius kelengkungan ρ ; semakin tajam takik (lebih kecil ρ), semakin besar k_t . Terdapat aturan umum, takik tumpul menghasilkan tegangan lokal yang lebih rendah, takik tajam menyebabkan tegangan lokal yang lebih tinggi. Untuk retak yang relatif kecil, cukup digunakan faktor $(a/\rho)^{1/2}$ saja, sehingga persamaannya menjadi:

$$\sigma_m = 2\sigma_0 \left(\frac{a}{\rho}\right)^{1/2} \quad (4-44a)$$

$$k_t = \frac{\sigma_m}{\sigma_0} = 2 \left(\frac{a}{\rho}\right)^{1/2} \quad (4-44b)$$

4.6.2 Fungsi tegangan Airy

Tinjau koordinat system X, Y, Z pada benda solid bertegangan. Pada tiap titik (x, y, z) dapat didefinisikan tegangan $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz})$. Pada kondisi tegangan bidang, $\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$. Pada kondisi regangan bidang $\varepsilon_z = 0$, sehingga $\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$.

Untuk masalah bidang, persamaan kesetimbangannya adalah:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = 0 \quad (4-45)$$

Jika perpindahan arah x dan y adalah u dan v , persamaan regangan menjadi:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (4-46)$$

Dan hubungan tegangan-regangan:

$$E \varepsilon_x = \sigma_x - \nu \sigma_y \quad (4-47a)$$

$$E \varepsilon_y = \sigma_y - \nu \sigma_x \quad (4-47b)$$

$$\mu \gamma_{xy} = \tau_{xy} \quad (4-47c)$$

Modulus geser μ berkaitan dengan dengan modulus Young, E menggunakan persamaan $\mu = E/2(1 + \nu)$ dengan ν rasio Poisson.

Persamaan kesetimbangan (4-45) secara otomatis dipenuhi oleh:

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2}, \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}, \quad \tau_{xy} = - \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} \quad (4-48)$$

Fungsi ψ disebut Fungsi Tegangan Airy. Substitusi persamaan (4-46) dan (4-48) ke dalam persamaan (4-47), dan didiferensiasikan dua kali untuk mendapatkan persamaan kompatibilitas:

$$\frac{\partial^4 \psi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \psi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \psi}{\partial y^4} = 0 \quad (4-49)$$

Atau

$$\nabla^2 (\nabla^2 \psi) = 0 \quad (4-50)$$

Masalah pemanjangan bidang pada kondisi elastisitas linear dapat diselesaikan dengan mencari fungsi tegangan ψ yang memenuhi persamaan (4-50). Tegangan menurut persamaan (4-48) juga harus memenuhi syarat batas masalah. Untuk kasus tertentu, fungsi tegangan harus diperkirakan berdasar pengujian.

4.6.3 Fungsi tegangan kompleks

Fungsi yang kompleks (rumit) dapat didefinisikan dengan persamaan:

$$Z(z) = \text{Re } Z + i \text{Im } Z \text{ dengan } z = x + iy \quad (4-51)$$

Agar Z menjadi fungsi analitik, derivatif dZ/dz harus didefinisikan dengan jelas. Ini mengarah pada kondisi Cauchy-Riemann:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \text{Re } Z}{\partial x} &= \frac{\partial \text{Im } Z}{\partial y} = \text{Re } \frac{dZ}{dz} \\ \frac{\partial \text{Im } Z}{\partial x} &= -\frac{\partial \text{Re } Z}{\partial y} = \text{Im } \frac{dZ}{dz} \end{aligned} \quad (4-52)$$

Untuk solusi masalah retak beberapa bentuk kompleks dari Fungsi Tegangan Airy dapat digunakan. Dalam kasus mode retak I mencukupi untuk menggunakan fungsi tegangan yang diusulkan oleh Westergaard, meskipun tidak sepenuhnya benar, namun tidak mempengaruhi hasilnya sejauh masih dalam pengertian tegangan tunggal yang bersangkutan.

Fungsi Westergaard adalah:

$$\psi = \text{Re } \bar{Z} + y \text{Im } \bar{Z} \quad (4-53)$$

Dengan $\bar{Z}$, $\bar{Z}$, dan $\bar{Z}$ diberikan oleh:

$$\frac{d\bar{Z}}{dz} = \bar{Z}, \quad \frac{dZ}{dz} = Z, \quad \frac{dZ}{dz} = Z' \quad (4-54)$$

Dengan persamaan Cauchy-Riemann (4-52) dapat diperoleh:

$$\nabla^2 \text{Re } Z = \nabla^2 \text{Im } Z = 0 \quad (4-55)$$

Yang berarti bahwa persamaan (4-53) secara otomatis memenuhi persamaan kompatibilitas (4-50). Dengan menggunakan persamaan (4-48) tegangan dapat ditentukan sebagai:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \text{Re } Z - y \text{Im } Z' \\ \sigma_y &= \text{Re } Z + y \text{Im } Z' \\ \tau_{xy} &= -y \text{Re } z' \end{aligned} \quad (4-56)$$

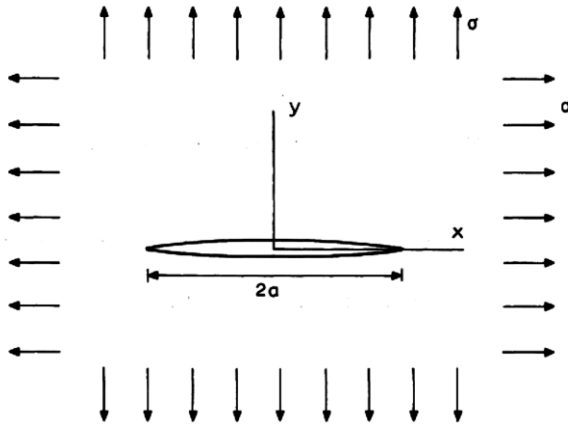
Setiap fungsi analitik $Z(z)$ akan menghasilkan tegangan yang ditentukan oleh persamaan (4-56). Namun perlu juga mencari fungsi $Z(z)$ yang memenuhi syarat batas sesuai masalah yang dibahas.

4.6.4 Penyelesaian masalah retak

Masalah retak mode I pada Gambar 4.31 menampilkan pelat tak terbatas dikenai tegangan biaksial. Fungsi tegangan pada kasus ini adalah:

$$Z = \frac{\sigma_z}{\sqrt{z^2 - a^2}}, \text{ dengan } z = x + iy \quad (4-57)$$

Fungsi ini analitis kecuali untuk $(-a \leq x \leq a, y = 0)$. Tegangan batas mengikuti persamaan (4-57). Pada kondisi tak terbatas, dimana $|z| \rightarrow \infty$, hasilnya adalah $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ dan $\tau_{xy} = 0$, dan pada muka retakan $\sigma_y = \tau_{xy} = 0$, yang berarti bahwa kondisi batas terpenuhi.



Gambar 4.31 Retak mode I akibat tegangan biaksial

Akan lebih baik jika dikonversikan menjadi system koordinat dengan titik awal pada ujung retak, sehingga z diganti menjadi $(z + a)$. Selanjutnya diubah menjadi masalah umum (Gambar 4.32) dimana kondisi batas tidak khusus. Z mengambil bentuk:

$$Z = \frac{f(z)}{\sqrt{z}} \quad (4-58)$$

di mana $f(z)$ berperilaku baik dan harus nyata dan konstan pada titik asal. Selanjutnya menurut persamaan (4-61) baik σ_x maupun τ_{xy} bernilai nol pada muka retak, yaitu sisi retak yang bebas tegangan. Nilai real dan konstanta yang diperlukan oleh $f(z)$ pada ujung retak diberi notasi K_I , sedemikian hingga:

$$Z_{|z| \rightarrow 0} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi z}} \quad (4-59)$$

Gunakan koordinat polar dari titik asalnya (Gambar 4.32) dengan $z = r e^{i\theta}$ maka tegangan pada ujung retak dapat dihitung dari persamaan (4-58) dan (4-59) menjadi:

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) (-\sigma) \quad (4-60)$$

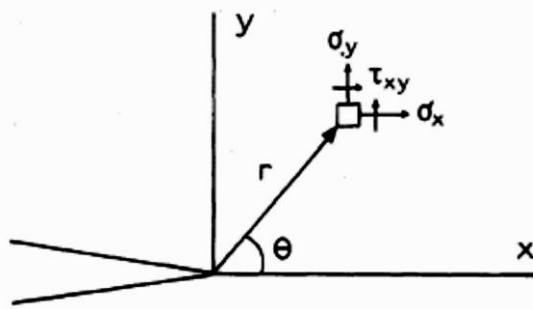
$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$$

atau

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta)$$

Lambang $(-\sigma)$ dihasilkan untuk kasus tegangan tarik uniaksial jika fungsi tegangan Westergard diterapkan dengan benar. Hal ini tidak berlaku untuk ekspresi tunggal.



Gambar 4.32 Masalah umum mode I

Untuk tegangan bidang $\sigma_z = 0$, untuk regangan bidang $\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$. Parameter K dalam persamaan ini dikenal sebagai Faktor Intensitas Tegangan. Untuk $r \rightarrow 0$ (pada ujung retak) tegangan menjadi tidak terbatas. Faktor intensitas tegangan selanjutnya diukur untuk tegangan tunggal pada ujung retak. Selama tegangan elastic maka nilainya harus proporsional dengan beban eksternal. Untuk kasus tarik uniaksial dengan σ tak terbatas, artinya K_I harus proporsional terhadap σ . Dalam rangka memberi dimensi yang sesuai pada tegangan pada persamaan (4-60), K_I harus proporsional juga dengan akar kuadrat Panjang a . Untuk pelat tak terbatas panjang karakteristik satu-satunya adalah ukuran retak, sehingga K_I harus diambil dari bentuk:

$$K_I = c \sigma \sqrt{a} \quad (4-61)$$

Pada kasus khusus tarik biaksial pada Gambar 4.32, fungsi tegangan diberikan oleh persamaan (4-57). Perpindahan awal dari system koordinat ke ujung retak mengubah persamaan (4-57) menjadi:

$$Z = \frac{\sigma(z+a)}{\sqrt{z(z+2a)}} \quad (4-62)$$

Perbandingan persamaan (4-59) dan (4-62) menunjukkan bahwa:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (4-63)$$

Karena dapat diduga bahwa sistem tegangan yang sejajar dengan retakan tidak terganggu oleh retakan, solusi untuk kasus uniaksial harus sama dengan kasus biaksial. Karena itu, faktor C dalam persamaan (4-56) sama dengan untuk pelat di bawah tegangan tarik uniaksial. Selain tegangan, perpindahan juga bisa ditentukan. Ini mengikuti persamaan (4-46) dan (4-56) bahwa untuk regangan bidang (plane strain):

$$v = \frac{1+\nu}{E} [2(1-\nu) \operatorname{Im} Z - y \operatorname{Re} Z]$$

$$u = \frac{1+v}{E} [(1-2v)Re Z - y Im Z] \quad (4-64)$$

Yang mengarahkan pada

$$\begin{aligned} u &= 2(1+v) \frac{K_I}{E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - 2v + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \\ v &= 2(1+v) \frac{K_I}{E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 - 2v - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \end{aligned} \quad (4-65)$$

Persamaan (4-60) untuk bidang tegangan adalah solusi untuk wilayah $r \approx 0$. Hal itu dapat digunakan pada di daerah di mana nilai r kecil dibandingkan dengan ukuran retak.

Dalam solusi umum, persyaratan orde tinggi $f(z)$ juga harus disertakan. Solusi umumnya adalah:

$$\sigma_{ij} = C_1 \left(\frac{r}{a}\right)^{-\frac{1}{2}} f_{1ij}(\theta) + C_2 \left(\frac{r}{a}\right)^0 f_{2ij}(\theta) + C_3 \left(\frac{r}{a}\right)^{\frac{1}{2}} f_{3ij}(\theta) + \dots \quad (4-66)$$

Atau

$$\sigma_{ij} = \frac{C_1}{\sqrt{r}} f_{1ij}(\theta) + \sum_{n=1}^{\infty} C_n f^{(n-1)/2}_{nij}(\theta) \quad (4-67)$$

Pernyataan dengan r^0 memastikan bahwa σ_x dan σ_y mendekati tegangan eksternal σ pada jarak yang sangat jauh dari retakan. Di sekitar ujung retakan, istilah orde yang lebih tinggi dapat diabaikan dan persamaan (4-60) diperoleh sebagai:

$$\sigma_{ij} = \frac{C_1}{\sqrt{r}} f_{ij}(\theta) \quad \text{dengan } C_I = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} \quad (4-68)$$

Analisis umum atas dasar Gambar 4.32 dan persamaan (4-68) menunjukkan bahwa bidang-bidang tegangan di sekitar retak ujung mode I selalu memiliki bentuk yang sama.

Hanya tersisa pekerjaan untuk menemukan K_I untuk konfigurasi tertentu.

4.6.5 Persamaan tegangan pada ujung retak (*crack tip*)

Jika suatu pelat dengan ketebalan yang tidak terbatas mengalami bukaan retakan mode I melalui ketebalannya sebesar $2a$ seperti pada Gambar 4.33. Pelat dikenai tegangan tarik σ dengan ukuran tak terbatas. Sebuah elemen $dx dy$ pada pelat dengan jarak r dari ujung retak (*crack tip*) dan dengan sudut θ terhadap bidang retak, akan mengalami tegangan normal σ_x dan σ_y dalam arah X dan Y dan tegangan geser τ_{xy} dengan persamaan (Broek, 1982):

$$\sigma_x = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (4-69)$$

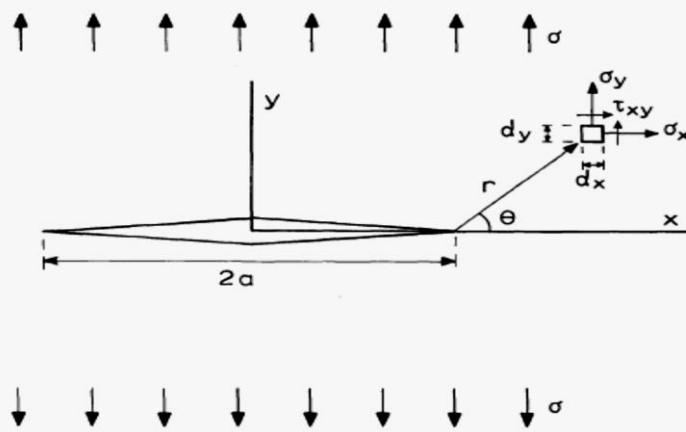
$$\sigma_y = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right]$$

$$\tau_{xy} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$$

$$\sigma_z = 0 \text{ (plane stress)}$$

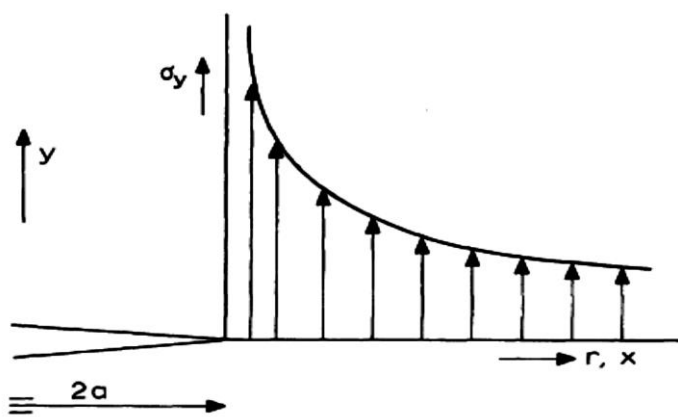
$$\sigma_z = \nu (\sigma_x + \sigma_y) \text{ (plane strain)}$$

$$a = \text{setengah panjang retak (the semi - crack length)}$$



Gambar 4. 33 Retakan pada pelat tidak terbatas
Sumber: (Broek, 1982)

Pada kasus elastis, tekanan yang terjadi akan proporsional dengan tegangan eksternal σ . Nilainya akan bervariasi sesuai dengan akar dari ukuran retak dan cenderung menjadi tak terhingga pada ujung retak dimana r bernilai kecil. Distribusi tegangan σ_y sebagai fungsi r pada $\theta = 0$ diilustrasikan pada Gambar 4.34.



Gambar 4. 34 Tegangan elastis σ_y pada ujung retak (crack tip)
Sumber: (Broek, 1982)

Untuk nilai r besar, tegangan σ_y mendekati nol. Persamaan (4-69) dapat ditulis dalam bentuk umum:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \text{ dengan } K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (4-70)$$

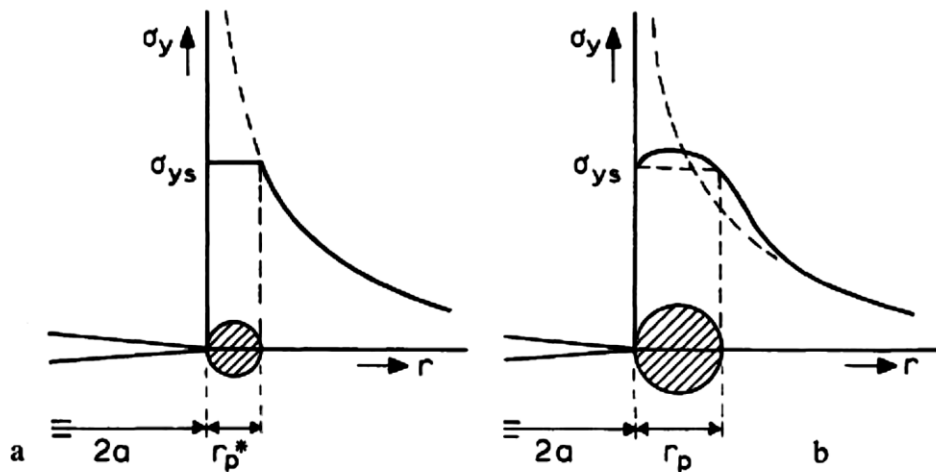
Persamaan (4-70) hanya valid untuk wilayah terbatas di sekitar ujung retak. Faktor K_I dikenal sebagai “faktor intensitas tegangan” dengan subskrip I adalah singkatan dari mode I. Seluruh bidang tegangan pada ujung retak diketahui ketika faktor intensitas tegangan diketahui.

4.6.6 Daerah plastis pada ujung retakan

Persamaan (4-70) adalah solusi elastis, yang tidak membatasi bahwa tegangan menjadi tak terbatas pada ujung retak. Pada kenyataannya hal ini tidak terjadi; deformasi plastik yang terjadi di ujung retak membuat tekanannya terbatas. Besarnya ukuran daerah plastis ujung retakan bisa didapat dengan menentukan jarak r_p^* dari ujung retak tegangan elastis σ_y (elastic stress) yang lebih besar dari tegangan leleh σ_{ys} (yield stress). Substitusi $\sigma_y = \sigma_{ys}$ ke dalam persamaan (4-69) untuk σ_y dan ambil bidang $\theta = 0$ akan diikuti dengan persamaan:

$$\begin{aligned}\sigma_y &= \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{0}{2} \left[1 + \sin \frac{0}{2} \sin \frac{3.0}{2} \right] = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cdot 1 \\ \sigma_y &= \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r_p^*}} = \sigma \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{a}{2r_p^*}} = \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r_p^*}} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r_p^*}} \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r_p^*}} = \sigma_{ys} \quad \text{atau} \quad r_p^* = \frac{K_I^2}{2\pi \sigma_{ys}^2} = \frac{\sigma^2 a}{2 \sigma_{ys}^2}\end{aligned}\quad (4-71)$$

Pada kenyataannya, daerah plastis adalah sesuatu yang lebih besar (Gambar 4.35b). Dengan demikian r_p^* secara langsung dapat dinyatakan sebagai fungsi “faktor intensitas tegangan” dan “tegangan leleh”. Jika dua retakan memiliki daerah plastis yang sama dan tekanan yang sama yang bekerja pada batas daerah, maka tegangan dan regangan di dalam daerah plastis harus sama. Faktor intensitas tegangan masih cenderung menentukan medan tegangan. Ini juga menentukan apa yang terjadi di dalam daerah plastis. K adalah ukuran untuk semua tegangan dan regangan. Perpanjangan retak akan terjadi ketika tegangan dan regangan di ujung retak mencapai nilai kritis. Ini berarti bahwa fraktur diharapkan terjadi ketika K_I mencapai nilai kritis K_{IC} . K_{IC} kritis dapat diharapkan menjadi parameter bahan.



Gambar 4. 35 Daerah plastis pada ujung retakan. a) asumsi distribusi tegangan; b) aproksimasi distribusi tegangan

Sumber: (Broek, 1982)

4.6.7 Persamaan faktor intensitas tegangan

Nilai kritis dari faktor intensitas tegangan pada saat terjadi kegagalan diberikan oleh:

$$K_{IC} = \sigma_c \sqrt{\pi a} \quad (4-72)$$

K_{IC} diukur untuk mengetahui ketahanan retak bahan. Oleh karena itu K_{IC} disebut sebagai ketangguhan fraktur (*fracture toughness*). Apabila satuan yang dipergunakan untuk tegangan tarik (*Tensile strength*) σ_u dan tegangan leleh (*yield strength*) σ_{ys} adalah MPa atau N/mm^2 , maka satuan untuk ketangguhan fraktur (*Fracture Toughness*) K_{IC} adalah $\text{N/mm}^{3/2}$. Untuk pelat dengan ukuran tertentu yang mengalami lentur, rumusnya menjadi:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} f(a/h) \quad (4-73)$$

dengan h adalah tebal pelat dan a adalah kedalaman retak. Fungsi $f(a/h)$ tentunya dapat diketahui sebelum K_{IC} dapat ditentukan. Tentu saja, $f(a/h)$ atau sering juga dinotasikan sebagai $f(\xi)$ mendekati satu untuk nilai $\xi = a/h$ kecil. Pembatasan harus dibuat untuk regangan transversal pada pelat. Nilai K_{IC} yang konsisten hanya dapat diperoleh dari pengujian jika perpindahan dalam arah ketebalan pelat dapat di tahan, yaitu ketika ada kondisi regangan bidang (*plane strain*). Ini terjadi ketika pelat memiliki ketebalan yang cukup besar. Namun jika deformasi dalam arah ketebalan dapat terjadi secara bebas (situasi *plane stress*) “faktor intensitas tegangan kritis” tergantung pada ketebalan pelat.

Intensitas tegangan untuk pelat tak terbatas (*infinite*) diberikan penyelesaiannya oleh Westergaard, Irwin (1958), dan Koiter (1959) dengan persamaan (Broek, 1982):

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \sqrt{\left(\frac{h}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{h}\right)} \quad (4-74)$$

Isida (1955) mengembangkan fungsi pemetaan untuk menurunkan faktor konsentrasi tegangan yang disajikan sebagai:

$$K = Y \sigma \sqrt{\pi a} \quad (4-75)$$

dengan Y adalah polynomial dalam a/h . Faktor $\sqrt{\pi}$ seringkali terkait juga dengan Y , namun kadang-kadang tidak. Persamaan polynomial order 4 memiliki bentuk umum:

$$ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e = 0 \quad (4-78a)$$

Dengan akar-akar x_1, x_2, x_3, x_4 yang bisa diperoleh dengan menggunakan persamaan:

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = -\frac{b}{a} \quad (4-78b)$$

$$x_1 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_3 + x_1 \cdot x_4 + x_2 \cdot x_3 + x_2 \cdot x_4 + x_3 \cdot x_4 = -\frac{c}{a} \quad (4-78c)$$

$$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 + x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 + x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 = -\frac{d}{a} \quad (4-78d)$$

$$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 = \frac{e}{a} \quad (4-78e)$$

4.6.8 Faktor geometri

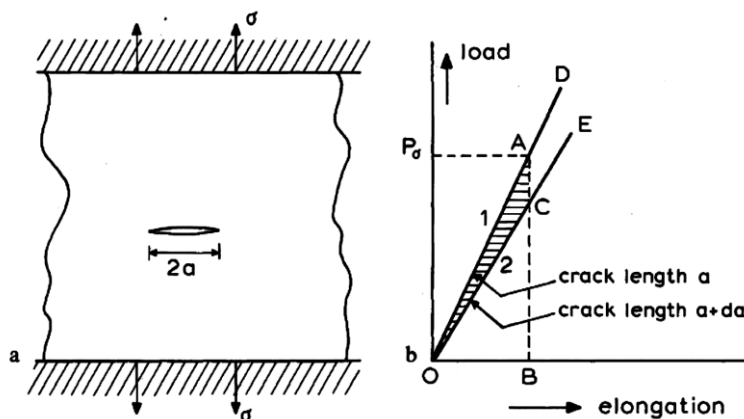
Faktor intensitas tegangan didefinisikan sebagai $K = \beta \sigma \sqrt{\pi a}$, di mana σ adalah tegangan nominal yang jauh dari retak. Faktor geometri β menyumbang fakta bahwa tekanan rata-rata di bagian retak lebih tinggi, juga untuk semua batas bebas mempengaruhi tegangan ujung retak seperti yang diungkapkan oleh K . Jadi $\beta = \beta(a/W, a/D, a/S, \dots)$, di mana W, D , dan S adalah dimensi struktural yang relevan, atau secara umum $\beta = \beta(a/L)$, L menjadi generalisasi panjang. Menentukan faktor geometri berarti derivasi fungsi $\beta(a/L)$ untuk rincian pembebanan dan geometri spesifik yang relevan dengan retak yang akan dianalisis. Cara di mana fungsi ini digunakan dalam pertumbuhan retak dan analisis fraktur tergantung pada definisi tegangan juga.

4.6.9 Kriteria Griffith

Tinjau pelat tebal tak terhingga dengan panjang satu satuan mengalami retak transversal sepanjang $2a$ di tengahnya. Pelat diberi tegangan hingga mencapai nilai tegangan σ yang bersifat tetap pada kedua tepinya seperti pada Gambar 4.36a. Diagram beban-perpindahan diberikan pada Gambar 4.36b. Energi elastis dalam pelat diwakili oleh area OAB. Jika retak berkembang sebesar da , kekakuan pelat akan turun (garis OC), yang berarti bahwa beban menurun karena tepi-tepi pelat tetap. Akibatnya, besarnya energi elastis akan turun ke

besaran yang diwakili oleh area OCB. Perambatan retak dari a ke $a+da$ akan menghasilkan pelepasan energi elastis yang sama besarnya ke area OAC.

Jika pelat di beri tegangan pada kondisi tegangan yang lebih tinggi akan ada pelepasan energi yang lebih besar jika retakan bertambah sebesar da . Griffith menyatakan bahwa propagasi retak akan terjadi jika energi yang dilepaskan pada pertumbuhan retak sudah cukup untuk menyediakan semua energi yang diperlukan untuk pertumbuhan retak. Jika yang terakhir tidak terjadi, tegangan harus dinaikkan. Segitiga ODE mewakili jumlah energi yang tersedia jika retakan akan tumbuh.



Gambar 4. 36 Kriteria Griffith untuk jepitan tetap: a) Pelat retak dengan ujung tetap; b) Energi elastis

Kondisi pertumbuhan retak adalah:

$$\frac{dU}{da} = \frac{dW}{da} \quad (4-81)$$

dengan U adalah energi elastis dan W energi yang dibutuhkan untuk pertumbuhan retak.

Berdasarkan perhitungan medan tegangan untuk cacat elips, Griffith menghitung dU/da sebagai:

$$\frac{dU}{da} = \frac{2\pi\sigma^2}{E} \quad (4-82)$$

per unit tebal pelat, dengan E adalah Modulus Young's. Biasanya dU/da diganti menjadi:

$$G = \frac{\pi\sigma^2 a}{E} \quad (4-83)$$

yang disebut "tingkat pelepasan energi elastis" per ujung retak. G juga disebut gaya pendorong retak: dimensinya energi per satuan tebal pelat dan per unit retak tambahan juga dimensi gaya per unit retak tambahan. Energi yang dikonsumsi dalam propagasi retak dilambangkan dengan $R = dW/da$ yang disebut ketahanan retak. G harus setidaknya sama dengan R sebelum perambatan retak dapat terjadi. Jika R adalah konstanta, ini berarti bahwa G harus melebihi nilai kritis tertentu G_{IC} . Maka pertumbuhan retak terjadi ketika:

$$\frac{\pi \sigma_c^2 a}{E} = G_{IC} \text{ atau } \sigma_c = \sqrt{\frac{EG_{IC}}{\pi a}} \quad (4-84)$$

Nilai kritis G_{IC} (laju pelepasan energi kritis) dapat ditentukan dengan mengukur tegangan σ_c yang diperlukan untuk mematahkan pelat dengan ukuran retak $2a$, dan dengan menghitung σ_c dari persamaan (4-84).

Griffith menurunkan persamaannya untuk kaca, yang merupakan bahan yang sangat rapuh. Oleh karena itu dia berasumsi bahwa R hanya terdiri dari energi permukaan. Dalam bahan daktil, seperti logam, deformasi plastik terjadi pada ujung retak. Banyak usaha diperlukan dalam menghasilkan daerah plastik baru di ujung retakan yang berkembang. Karena daerah plastik ini harus diproduksi pada pertumbuhan retak energi untuk pembentukannya dapat dianggap sebagai energi yang diperlukan untuk perambatan retakan. Ini berarti bahwa untuk logam nilai R lebih utama disebabkan energi plastik; energi permukaan sangat kecil sehingga dapat diabaikan. Kriteria energi adalah kriteria yang diperlukan untuk pengembangan retak. Itu tidak perlu menjadi kriteria yang harus dipenuhi. Bahkan jika energinya mencukupi untuk menghasilkna perambatan retak, retakan tidak akan merambat kecuali jika bahan di ujung retak siap untuk gagal: bahan harus berada di ujung kapasitasnya untuk menahan beban dan menjalani regangan lebih lanjut. Namun, kriteria terakhir setara dengan kriteria energi, karena mengikuti dari persamaan (4-71) dan (4-84) bahwa:

$$\frac{K_I^2}{E} = G \quad (4-85)$$

Terlihat bahwa kriteria tegangan dan kriteria energi terpenuhi secara bersamaan. Oleh karena itu, persamaan (4-72) dan (4-84) adalah setara. Persamaan (4-85) berlaku untuk plane stress dan bahwa persamaan (1- v^2) harus ditambahkan dalam kasus plane strain, yang menjadikan persamaan sebagai:

$$(1 - v^2) \frac{K_I^2}{E} = G_{IC} \text{ dan } (1 - v^2) \frac{K_{Ic}^2}{E} = G_{IC} \quad (4-86)$$

Fraktur akan terjadi apabila

$$\frac{dW}{da} = \frac{\pi \sigma^2 a}{E} \quad (4-87)$$

Biasanya, energi fraktur per satuan penambahan tinggi retak dW/da dinyatakan sebagai R (ketahanan fraktur), sementara rata-rata pelepasan energi dU/da menurut persamaan (4-82) dinyatakan sebagai G . Sehingga persamaan (4-87) dapat diringkas menjadi (Broek, 1982):

$$R = \frac{\pi \sigma^2 a}{E} \text{ atau } G = R. \quad (4-88)$$

Persamaan (4-88) menunjukkan bahwa fraktur terjadi ketika $(\pi\sigma^2 a)$ mencapai nilai tertentu, yaitu ER . Sekarang perhatikan bahwa $(\pi\sigma^2 a)$ adalah merupakan kuadrat dari Faktor Intensitas Tegangan K . Oleh karena itu, persamaan menyatakan bahwa fraktur terjadi ketika K^2 mencapai nilai tertentu, atau sama dengan K mencapai nilai tertentu. Fraktur terjadi jika $K = \sqrt{ER}$ yang artinya adalah *Toughness*. Dengan demikian ketahanan fraktur bisa dihitung dengan persamaan (Broek, 1982):

$$R = \frac{K_c^2}{E} \quad (4-89)$$

4.6.10 Prediksi Lebar retak

1. *Prediksi lebar retak dengan konfigurasi pelat lentur murni*

Faktor intensitas tegangan menggambarkan medan tegangan dan daerah plastik. Faktor intensitas tegangan yang sama akan memberikan medan tegangan yang sama dan daerah plastis yang sama. Fraktur terjadi ketika K melebihi nilai kritis, K_{Ic} .

Rasio tegangan maksimum terhadap tegangan leleh disebut faktor kendala plastik atau *plastic constraint factor* ($p.c.f = \sigma_{max}/\sigma_{ys}$). Hasil perkalian $p.c.f \times \sigma_{ys}$ dapat dianggap sebagai tegangan leleh efektif. Untuk kasus tegangan bidang (plane stress), faktor kendala plastik bernilai 1, yang berarti $\sigma_{max} = \sigma_{ys}$.

Salah satu hal yang penting untuk dipahami juga adalah perpindahan dari tepi retak (*Crack Opening Displacement* atau COD) sebagaimana terlihat pada Gambar 4.37. Besaran nilai COD tersebut dapat diselesaikan dengan persamaan:

$$COD = 2v = \frac{4\sigma}{E} \sqrt{a^2 - x^2} \quad (4-90)$$

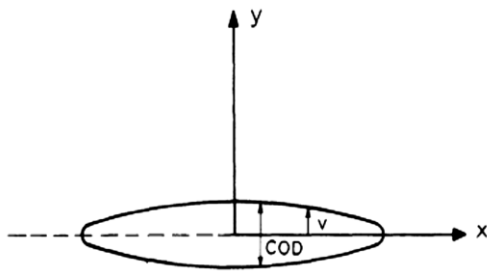
Nilai ($x = a$) terdapat pada ujung retakan. Jika plastisitas terjadi, ujung retak tumpul terjadi dan pembukaan ujung retak (CTOD) mungkin tidak nol, sedangkan untuk $x = a$, prediksi nilai dari persamaan (4-90) yang merupakan CTOD = 0. Dengan mengaplikasikan koreksi daerah plastik ke persamaan (4-90) bisa diperoleh persamaan:

$$COD = \frac{4\sigma}{E} \sqrt{(a + r_p^*)^2 - x^2} \quad (4-91)$$

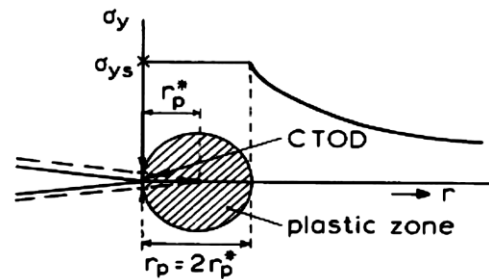
Sementara itu nilai CTOD bisa diperoleh jika ($x = a$), sehingga:

$$CTOD = \frac{4\sigma}{E} \sqrt{(a + r_p^*)^2 - a^2} \approx \frac{4\sigma}{E} \sqrt{2ar_p^*} = \frac{4}{\pi} \frac{K^2}{E \sigma_{ys}} \quad (4-92)$$

Yang ditunjukkan oleh Gambar 4.38.



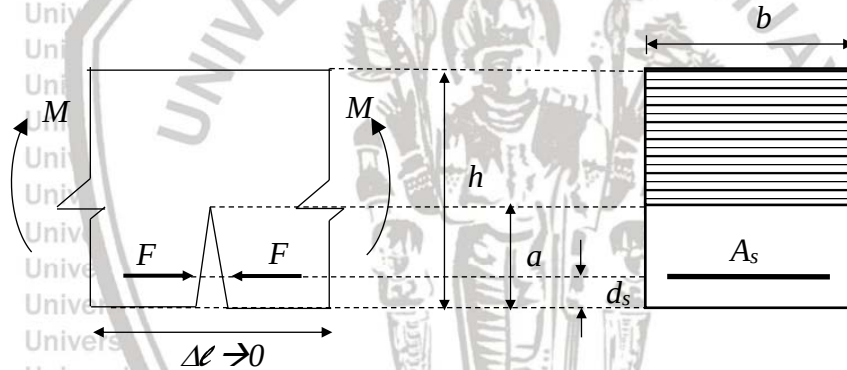
Gambar 4. 37 Crack Opening Displacement
Sumber: (Broek, 1982)



Gambar 4. 38 Koreksi daerah plastis Irwin.
Sumber: (Broek, 1982)

2. Prediksi lebar retak dengan konfigurasi reaksi tulangan dan momen lentur

Ketika elemen yang retak mendapatkan penambahan beban secara simultan dan masih dapat dianggap sebagai berperilaku elastis, maka pengaruh penggabungan gaya dalam dan momen terhadap deformasi juga harus dipertimbangkan.



Gambar 4. 39 Elemen retak
Sumber: (Carpinteri, 1992)

Jika ditinjau suatu elemen retak seperti terlihat pada Gambar 4.39, yang secara simultan menahan momen lentur M dan gaya F yang menutup permukaan retakan. Kita dapat mengevaluasi bahwa deformasi angular $\Delta\varphi_{MF}$ dihasilkan oleh gaya F , bersama dengan perpindahan bukaan retak (COD) $\Delta\delta_{FF}$ pada titik dimana gaya F bekerja, dan, pada saat yang sama, deformasi bukaan retak (COD) $\Delta\delta_{FM}$, yang disebabkan oleh momen lentur M , bersama dengan deformasi angular $\Delta\varphi_{MM}$. Superposisi linier bisa ditulis:

$$\Delta\delta = \Delta\delta_{FM} + \Delta\delta_{FF} = \lambda_{FM} M - \lambda_{FF} F \quad (4-93)$$

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{MM} + \Delta\varphi_{MF} = \lambda_{MM} M - \lambda_{MF} F \quad (4-94)$$

dengan λ_{MM} , λ_{FM} , λ_{MF} , dan λ_{FF} adalah compliance dari elemen akibat adanya retakan.

3. **Prediksi lebar retak pada peraturan beton**

Dalam melakukan prediksi lebar retak yang terjadi pada pelat beton serat kinerja tinggi ini dipergunakan 3 rumusan persamaan lebar retak, yaitu persamaan lebar retak berdasarkan *Building code requirements for structural concrete (ACI 318M-14) and commentary (ACI 318RM-14) (ACI 318M-14, 2014)*, *Eurocode 2: Background & applications design of concrete buildings (Eurocode 2, 2014)*, dan berdasarkan *Crack Control of Slabs (Part 1: AS 3600 Design) OneSteel Reinforcing Guide to Reinforced Concrete Design (Patrick & Wheeler, 2000)*.

4. **Validasi persamaan untuk memprediksi lebar retak**

Persamaan untuk memprediksi lebar retak yang dihasilkan dari metode *linear elastic fracture mechanic*, selanjutnya divalidasi dengan membandingkan hasil perhitungan lebar retak yang diperoleh dengan hasil-hasil perhitungan maupun hasil pengujian laboratorium. Sebagai pembanding digunakan hasil prediksi lebar retak menurut peraturan beton dan hasil uji lebar retak.



HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN



BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Karakteristik Bahan Penyusun Beton Kinerja Tinggi

Penelitian ini ditujukan untuk memeriksa sifat-sifat (*properties*) pasir, kerikil, dan bahan lain yang digunakan sebagai bahan pembuatan beton serat kinerja tinggi. Pada SNI tentang “Tata cara pemilihan campuran untuk beton normal, beton berat dan beton massa” (SNI 7656:2012, 2012), disebutkan bahwa data bahan yang dibutuhkan untuk menentukan proporsi campuran meliputi:

1. Hasil analisis saringan agregat halus dan agregat kasar (SNI 03-1968-1990, 1990)
2. Berat jenis dan penyerapan air agregat halus (SNI 1970:2008, 2008)
3. Berat jenis dan penyerapan air agregat kasar (SNI 1969:2008, 2008)
4. Kadar air agregat (SNI 03-1971-1990, 1990).
5. Hasil uji keausan agregat dengan mesin abrasi Los Angeles (SNI 2417:2008, 2008)

Agregat halus adalah agregat yang ukuran butirannya lebih kecil dari 4,75 mm (No. 4) dan biasa disebut pasir. Analisis saringan agregat halus dilakukan pada pasir dengan kondisi jenuh permukaan kering (SSD). Cara pengujian kondisi *Saturated Surface Dry* (SSD) pasir dan proses analisis saringan pasir diperlihatkan pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1 Pengujian kondisi SSD dan analisis saringan agregat halus

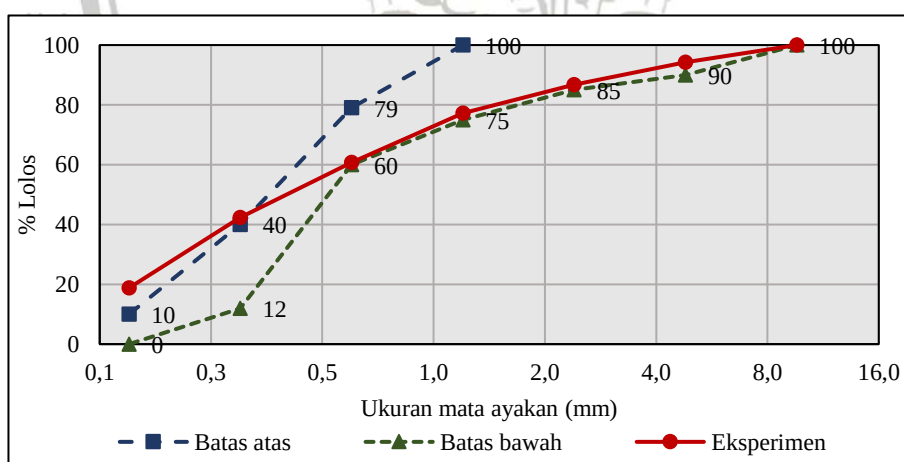
Modulus kehalusan atau *Fineness Modulus* (FM) digunakan dalam menentukan tingkat keseragaman gradasi agregat halus dalam desain campuran beton kinerja tinggi. Ini adalah angka empiris yang berkaitan dengan kehalusan agregat. Semakin tinggi modulus kehalusan, berarti semakin kasar agregatnya. Nilai 2,40 hingga 3,00 merupakan nilai umum

untuk agregat halus beton kinerja tinggi (AASHTO T27/T11, 2014). Hasil analisis saringan pasir sesuai SNI 03-1968-1990 (1990) dapat dilihat pada Tabel 5.1.

Tabel 5. 1 Hasil Analisis Saringan Pasir (SNI 03-1968-1990, 1990)

Saringan	Tertahan pada saringan			% kumulatif	
	Nomor	mm	gram	%	Tertahan Lolos
4		4,75	47,05	4,71	95,29
8		2,36	112,65	11,28	84,01
16		1,18	166,80	16,70	67,30
30		0,60	167,45	16,77	50,54
50		0,30	230,20	23,05	27,48
100		0,15	187,80	18,81	8,68
pan		0,00	86,65	8,68	
Jumlah			998,6	100,0	266,7
Modulus halus:		2,67		Zona:	3

Pasir Lumajang (dari gunung Semeru) yang diuji memiliki modulus halus sebesar 2,67 sesuai data pada Tabel 5.1 dan termasuk kategori zona 3 apabila di plotkan pada diagram zona pasir dengan batasan sebagaimana terlihat pada Gambar 5.2 dan Tabel L2.1 pada Lampiran 2. Pasir dengan modulus halus sekitar 3,0 memberikan kemampuan kerja dan kuat tekan terbaik bagi campuran beton yang dihasilkan, sedangkan modulus kehalusan di bawah 2,5 menyebabkan konsistensi atau kekentalan adukan yang berlebihan atau lengket, sehingga sulit untuk dipadatkan (ACI 363R-10, 2010).



Gambar 5. 2 Zona pasir hasil analisis saringan (SNI 03-2834-2000, 2000)

Kadar air pasir adalah besarnya perbandingan antara berat air yang dikandung pasir dengan berat pasir dalam keadaan kering, dinyatakan dalam persen. Nilai rata-rata dari hasil uji kadar air pasir sesuai SNI 03-1971-1990 (1990) adalah sebesar 2,80% sebagaimana terlihat pada Tabel 5.2.

Tabel 5. 2 Hasil Uji Kadar Air Pasir (SNI 03-1971-1990, 1990)

Percobaan Nomor	1	2
Berat pasir asli (W_1)	500,0	500,0
Berat pasir kering oven (W_2)	486,6	486,2
$w = (W_1 - W_2) / W_2 * 100\%$	2,75	2,84
Kadar air rata - rata (%)	2,80	

Penyerapan air adalah penambahan berat suatu agregat akibat air yang meresap ke dalam pori-pori, tetapi belum termasuk air yang tertahan pada permukaan luar partikel, dan dinyatakan sebagai persentase dari berat keringnya. Hasil uji penyerapan air pada pasir yang dianalisis berdasarkan SNI 1970:2008 (2008) adalah sebesar 0,30% sebagaimana terlihat pada Tabel 5.3.

Tabel 5. 3 Hasil Uji Penyerapan Air pada Pasir (SNI 1970:2008, 2008)

Percobaan Nomor	1	2
Berat pasir SSD (S)	500,0	500,0
Berat pasir oven (A)	498,3	498,7
$S_w = [(S-A)/A] * 100\%$	0,34	0,26
Penyerapan air rata-rata (%)	0,30	

Berat jenis pasir merupakan perbandingan antara berat dari satuan volume pasir terhadap berat air dengan volume yang sama pada temperatur yang ditentukan. Nilainya tanpa dimensi. Berat jenis pasir menurut hasil pengujian yang dilaksanakan sesuai SNI 1970:2008 (2008) pada Tabel 5.4. adalah sebesar 2,70.

Tabel 5. 4 Hasil Uji Berat Jenis Pasir (SNI 1970:2008, 2008)

Percobaan Nomor	1	2
Berat picno+pasir+air (w_1) (gram)	992,5	992,1
Berat pasir SSD (gram)	500,0	500,0
Berat picno+air (w_2) (gram)	677,2	677,2
$B_j = 50 / (50 - w_1 + w_2)$	2,71	2,70
Berat jenis pasir rata-rata	2,70	

Pengujian kadar lumpur dalam pasir sesuai ASTM C 117-03 (2012) dengan hasil pada Tabel 5.5 menunjukkan bahwa pasir bersih dari lumpur, sehingga dapat digunakan sebagai bahan campuran beton.

Tabel 5. 5 Hasil Uji Kebersihan Pasir terhadap Lumpur (ASTM C 117-03, 2012)

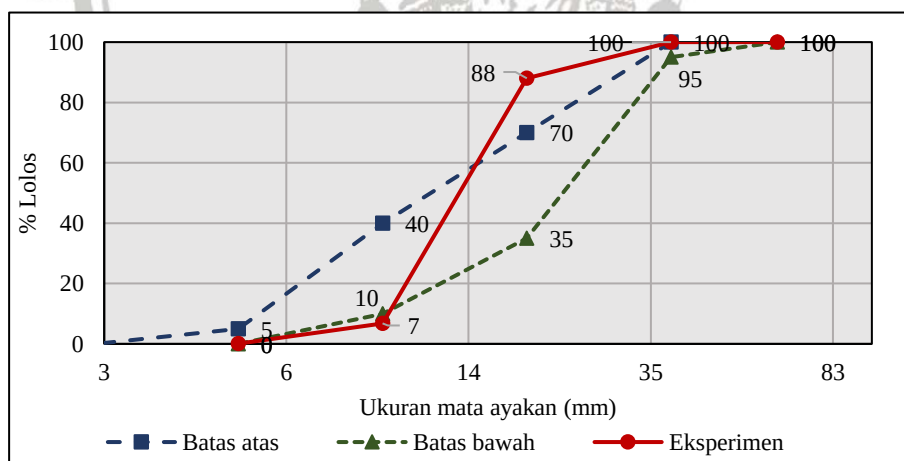
Percobaan nomor	1
Tinggi pasir (H) inch	4,7
Tinggi lumpur (h) inch	0,0
Kadar lumpur (h/H)*100%	0,0

Analisis saringan agregat kasar dilaksanakan dengan menggunakan sampel uji berupa kerikil sebanyak 5 kg. Agregat kasar yang akan digunakan direncanakan untuk memiliki nominal ukuran agregat maksimal 19,0 mm (ASTM C 136-01, 2001). Hasil analisis saringan kerikil ditampilkan pada Tabel 5.6. Modulus kehalusan kerikil menurut hasil analisis ini adalah sebesar 7,05.

Tabel 5.6 Hasil Analisis Saringan Kerikil (SNI 03-1968-1990, 1990)

Saringan		Tertahan pada saringan		% kumulatif	
Nomor	mm	gram	%	Tertahan	Lolos
3/4	19,0	585,8	12,00	12,00	88,0
3/8	9,5	3.965,9	81,21	93,20	6,80
4	4,75	328,4	6,72	99,93	0,07
8	2,36	0,0	0,0	99,93	0,07
16	1,18	0,0	0,0	99,93	0,07
30	0,60	0,0	0,0	99,93	0,07
50	0,30	0,0	0,0	99,93	0,07
100	0,15	0,0	0,0	99,93	0,07
pan	0,00	3,5	0,07		
jumlah		4.883,6	100,00	704,77	
Modulus halus:	7,05		Zona:	1	

Hasil analisis saringan kerikil pada Tabel 5.6 selanjutnya diplotkan pada batas-batas zona kerikil, dan hasilnya dapat dilihat pada Gambar 5.3 dan Tabel L2.2 Lampiran 2.



Gambar 5.3 Hasil analisis saringan kerikil pada diagram kerikil zona 1 (ukuran maksimum 40 mm) sesuai (SNI 03-2834-2000, 2000)

Dari Gambar 5.3, kerikil yang diuji dapat diklasifikasikan berada pada zona 1, yaitu kerikil yang memiliki ukuran maksimum 40 mm, meskipun terdapat penyimpangan, yaitu hanya 88% kerikil lolos ayakan no. 3/4 (19,0 mm). Dalam proses perencanaan campuran beton perlu mengkombinasikan kerikil dengan pasir agar memenuhi batas gradasi agregat yang memenuhi nilai batas maksimum 19,0 mm.

Kadar air kerikil adalah besarnya perbandingan antara berat air yang dikandung kerikil dengan berat kerikil dalam keadaan kering, dinyatakan dalam persen. Kadar air kerikil yang diuji memiliki nilai rata-rata sebesar 1,19% seperti terlihat pada Tabel 5.7. Kadar air kerikil ini akan digunakan untuk menghitung perbandingan air dan bahan pengikat (*Water/Binder ratio* atau *W/B*) dalam rencana campuran beton kinerja tinggi.

Tabel 5. 7 Hasil Uji Kadar Air Kerikil (SNI 03-1971-1990, 1990)

Percobaan Nomor		1	2
Berat kerikil asli (W_1)	(gram)	3.000,0	3.000,0
Berat kerikil kering oven (W_2)	(gram)	2.964,5	2.964,9
$W = (W_1 - W_2) / W_2 * 100\%$	(%)	1,20	1,18
Kadar air kerikil rata - rata (%)		1,19	

Angka penyerapan air pada kerikil digunakan untuk menghitung perubahan berat dari kerikil akibat air yang diserap ke dalam pori di antara partikel utama dibandingkan dengan pada saat kondisi kering, ketika kerikil tersebut dianggap telah cukup lama kontak dengan air sehingga air telah diserap penuh. Kadar penyerapan air pada kerikil yang diuji adalah sebesar 1,95% sebagaimana terlihat pada Tabel 5.8.

Tabel 5. 8 Hasil Uji Penyerapan Air pada Kerikil (SNI 1969:2008, 2008)

Percobaan Nomor		1	2
Berat kerikil kondisi SSD (B)	(gram)	4.969,0	4.978,7
Berat kerikil kering oven (A)	(gram)	4.881,3	4.875,8
$Sw = [(B - A) / A] * 100\%$	(%)	1,80	2,11
Penyerapan air rata-rata (%)		1,95	



(a)



(b)



(c)

Gambar 5. 4 Pengujian berat jenis agregat kasar. (a) Kerikil pada kondisi kering oven; (b) Pengujian berat jenis; (c) skala beberapa butiran kerikil.

Pengujian berat jenis kerikil (*specific gravity*) dilakukan terhadap bahan kerikil kering oven seperti terlihat pada Gambar 5.4. Hasil analisis berat jenis kerikil sesuai SNI 1969:2008 (2008) adalah 2,69 sebagaimana tercantum dalam Tabel 5.9. Berat jenis ini disebut juga sebagai berat jenis curah (jenuh kering permukaan), yaitu perbandingan antara berat dari satuan volume kerikil (termasuk berat air yang terdapat di dalam rongga akibat perendaman selama (24+4) jam, tetapi tidak termasuk rongga antara butiran partikel) pada suatu temperatur tertentu terhadap berat di udara dari air suling bebas gelembung dalam volume yang sama pada suatu temperatur tertentu. Berat jenis curah umumnya digunakan dalam menghitung volume yang ditempati oleh kerikil dalam berbagai campuran yang diproporsikan atau dianalisis berdasarkan volume absolut, seperti beton semen dan beton aspal.

Tabel 5. 9 Hasil Uji Berat Jenis Kerikil (SNI 1969:2008, 2008)

Percobaan Nomor		1	2
Berat kerikil kondisi SSD (<i>B</i>)	(gram)	4.969,0	4.978,7
Berat kerikil dalam air (<i>C</i>)	(gram)	3.147,0	3.105,0
$B_j = B/(B-C)$		2,73	2,66
Berat jenis rata-rata		2,69	

Di samping analisis saringan, dilakukan juga pemeriksaan sifat mekanik kerikil saat diuji keausannya dengan alat *Los Angeles* seperti terlihat pada Gambar 5.5. Pengujian ini ditujukan untuk mengukur degradasi kerikil dengan gradasi standar yang dihasilkan dari kombinasi tindakan berupa abrasi atau gesekan, benturan, dan penggilingan dalam drum baja berputar yang berisi sejumlah bola baja, dengan jumlah tergantung pada gradasi kerikil (ASTM C 131-03, 2003). Batasan gradasi kerikil yang diuji adalah yang lolos saringan berukuran 19,0 mm dan tertahan saringan berukuran 12,5 mm dan kerikil yang lolos saringan berukuran 12,5 mm dan tertahan saringan berukuran 9,5 mm (SNI 2417:2008, 2008). Hasil pengujiannya bisa dilihat pada Tabel 5.10 dengan nilai keausan rata-rata dari kerikil sebesar 18,65%. Dengan nilai keausan atau abrasi kurang dari 20%, maka kerikil yang diuji ini dapat digolongkan sebagai agregat keras. Hal ini memenuhi kriteria yang ditentukan dalam persyaratan sifat fisik agregat kasar untuk beton (ASTM C 33-03, 2003).



Gambar 5. 5 Pengujian keausan agregat kasar dengan Los Angeles test

Tabel 5. 10 Hasil Uji Keausan Kerikil dengan Mesin Abrasi *Los Angeles*

Gradasi kerikil yang diuji		Jumlah = 500 putaran	
Ukuran Saringan		I	II
Lolos	Tertahan	Berat (a) gram	Berat (a) gram
19,0 (3/4")	12,5 (1/2")	2.500,0	2.500,0
12,5 (1/2")	9,5 (3/8")	2.500,0	2.500,0
Jumlah Berat		5.000,0	5.000,0
Berat tertahan saringan No. 12 sesudah percobaan (b) gram		4.314,5	3.821,0
1 a =	5.000,0 gram	II. a =	5.000,0 gram
b =	4.314,5 gram	b =	3.821,0 gram
a-b =	685,5 gram	a-b =	1.179,0 gram
Keausan I		Keausan II	
= [(a-b)/a] x 100% =		= [(a-b)/a] x 100% =	
Keausan rata-rata =		13,71%	
		23,58%	
		18,65%	

Dari pengujian sifat fisik dan sifat mekanik agregat yang telah dilaksanakan, hasilnya direkap dalam Tabel 5.11.

Tabel 5. 11 Rekapitulasi Hasil Uji Sifat Fisik dan Mekanik Agregat

Sifat fisik pasir	Unit	Nilai
Modulus kehalusan	-	2,67
Kelembaban	%	2,80
Penyerapan air	%	0,30
Berat jenis	-	2,70
Kadar lumpur < 75-µm	%	0,00
Sifat fisik dan mekanik kerikil		
Modulus kehalusan	-	7,05
Kelembaban	%	1,19
Penyerapan air	%	1,95
Berat jenis	-	2,69
Nilai keausan kerikil	%	18,65

5.2 Rancangan Campuran Beton Kinerja Tinggi

Rancangan campuran beton serat kinerja tinggi (HPFRC) disusun menggunakan metode volume absolut sesuai "*Standard Practice for Selecting Proportions for Normal Heavyweight, and Mass Concrete*" (ACI 211.1-91) Reapproved 2009 (ACI 211.1-91, 2009) yang telah diadopsi di Indonesia sebagai "Tata cara pemilihan campuran untuk beton normal, beton berat dan beton massa" (SNI 7656:2012, 2012). Dengan anggapan bahwa beton kinerja tinggi tergolong sebagai beton berat, artinya bahwa berat isi beton setelah mengeras lebih dari 2.500 kg/m^3 , dalam rencana campuran ini digunakan asumsi nilai berat volume beton setelah mengeras adalah 2.700 kg/m^3 . Berat volume sebenarnya akan diperiksa melalui penimbangan berat benda uji sebelum dilakukan pengujian kuat tekan.

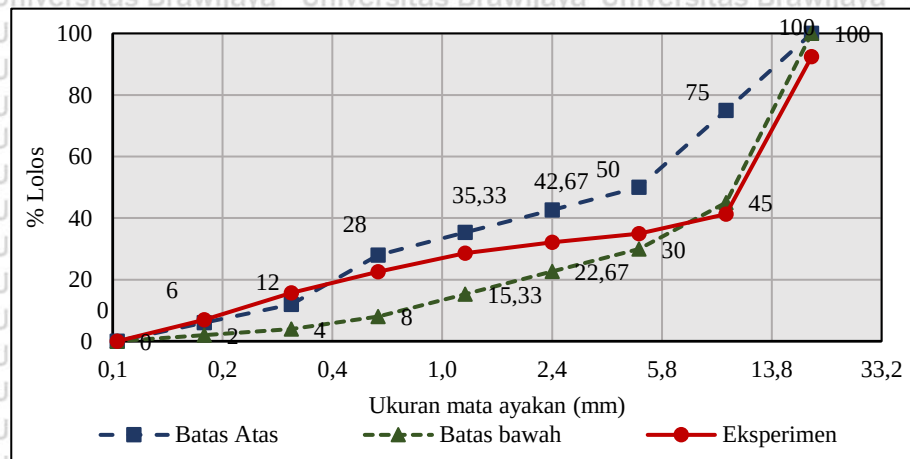
5.2.1 Rancangan campuran

Untuk menentukan kadar air yang digunakan, disusun rencana campuran beton kinerja tinggi HPC menggunakan *mix design sheet* untuk campuran beton dengan perbandingan air/bahan pengikat atau *Water/Binder ratio* (W/B) pada lampiran 3. Rencana campuran beton HPC per meter kubik untuk *W/B ratio* 0,32 hingga 0,20 terlihat pada Tabel 5.12. Pembuatan benda uji dan pelaksanaan uji kuat tekan dilaksanakan dua tahap, yaitu tahap 1 untuk *W/B ratio* 0,32 hingga 0,26 dan tahap 2 untuk *W/B ratio* 0,23 dan 0,20.

Tabel 5. 12 Komposisi Rencana Campuran Beton per m^3 .

Nama campuran beton	Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4	Mix 5	Mix 6
<i>W/B ratio</i>	0,32	0,30	0,28	0,26	0,23	0,20
Air (liter)	121,54	121,76	122,02	122,32	120,40	121,10
Semen (kg)	393,75	420,00	450,00	484,62	547,80	630,00
Silika fume (kg)	43,75	46,67	50,00	53,85	60,90	70,00
Kerikil (kg)	1.066,80	1.066,80	1.066,80	1.066,80	992,40	992,40
Pasir (kg)	825,77	798,47	767,26	731,26	742,70	657,30
Superplastisizer (liter)	9,04	9,64	10,33	11,13	12,60	14,50

Dari komposisi campuran pada Tabel 5.12, susunan gradasi gabungan pasir dan kerikil telah dapat memenuhi zona agregat dengan diameter maksimum 19,0 mm sesuai batas gradasi agregat kasar SNI 7656:2012 (2012) pada Gambar 5.6 dan Tabel L2.3 Lampiran 2.



Gambar 5. 6 Zona agregat gabungan dengan diameter maksimum 19,0 mm (SNI 03-2834-2000, 2000).

Agregat berukuran lebih besar akan membutuhkan adukan mortar per satuan isi beton lebih sedikit. Agregat kasar maksimum dengan gradasi baik menimbulkan rongga udara lebih sedikit dibandingkan dengan agregat berukuran lebih kecil. Namun, beton berkekuatan tinggi akan diperoleh lebih baik jika dibuat menggunakan ukuran nominal agregat maksimum yang lebih kecil. Proses pengurangan ukuran akan menghilangkan cacat internal dalam agregat, seperti pori-pori besar, *microcracks* dan inklusi mineral lunak. Hal ini akan memberikan kekuatan lebih tinggi pada rasio air-semen yang diberikan. (Aitcin, 2004).

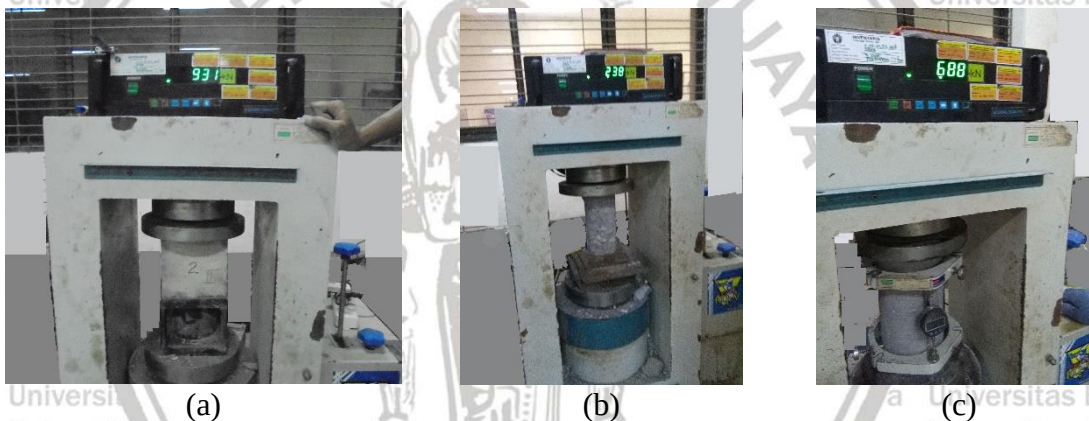
Untuk pengecoran tahap 1, volume setiap adukan yang digunakan dalam pengecoran pembuatan benda uji adalah 66,94 m³. Hasil pengecoran setiap komposisi rencana campuran dapat menghasilkan 3 buah silinder $\phi 15$ cm x 30 cm, 3 buah silinder berukuran $\phi 10$ cm x 20 cm dan 1 buah kubus berukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm. Pada pengecoran tahap 2, jumlah berat campuran dalam satu adukan sebesar 162,78 kg. Benda uji yang dihasilkan dari pengecoran ini terdiri dari 9 buah silinder $\phi 15$ cm x 30 cm, 3 buah silinder $\phi 10$ cm x 20 cm dan 3 buah kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm. Proses pengecoran dan perawatan benda uji dapat dilihat pada Gambar 5.7.



Gambar 5.7. Pengecoran dan perawatan benda uji beton

5.2.2 Pengujian kuat tekan dan deformasi aksial benda uji

Proses uji kuat tekan untuk $W/B \text{ ratio} = (0,32 - 0,20)$ meliputi penimbangan benda uji, uji kuat tekan semua benda uji dan pemeriksaan deformasi benda uji silinder $\phi 15 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ seperti terlihat pada Gambar 5.8.



Gambar 5.8 Uji kuat tekan beton. (a) kubus $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ (b) silinder $\phi 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$. (c) silinder $\phi 15 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$

Rata-rata hasil pengujian 3 buah benda uji silinder $\phi 15 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ pada usia 28 hari pada tabel 5.13 memperlihatkan bahwa perbandingan kadar air-bahan pengikat ($W/B \text{ ratio}$) sebesar 0,23 bisa didapat kuat tekan sebesar 60,05 MPa. Rata-rata hasil pengujian kuat tekan kubus $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ dan silinder $\phi 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ pada usia 28 hari, beserta berat rata-ratanya dapat dilihat pada Tabel 5.14.

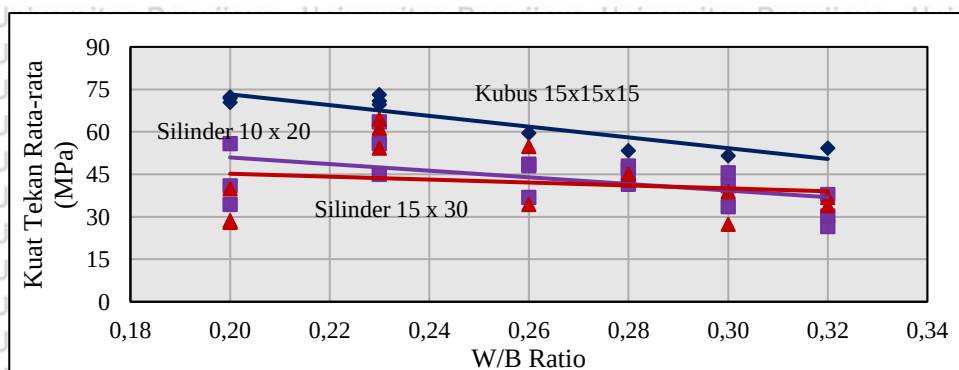
Tabel 5. 13 Kuat Tekan Silinder $\phi 15$ cm x 30 cm Beton Kinerja Tinggi

Benda Uji	Silinder $\phi 15$ cm x 30 cm								
Umur pengujian	7 hr			14 hr			28 hr		
	Berat	Kuat Tekan	Defor masi	Berat	Kuat Tekan	Defor masi	Berat	Kuat Tekan	Defor masi
Satuan	kg	Mpa	mm	Kg	Mpa	mm	kg	Mpa	mm
W/B = 0,32	12,95	27,72	0,92	-	-	-	13,18	35,38	0,66
W/B = 0,30	13,25	27,26	-	-	-	-	13,05	33,12	0,88
W/B = 0,28	13,20	37,73	0,82	-	-	-	13,10	44,04	1,20
W/B = 0,26	13,15	38,29	0,86	-	-	-	13,13	44,63	1,04
W/B = 0,23	12,92	30,19	0,67	13,37	39,48	0,46	13,65	60,05	0,54
W/B = 0,20	13,02	42,52	0,77	13,30	29,79	0,42	13,37	32,19	0,29

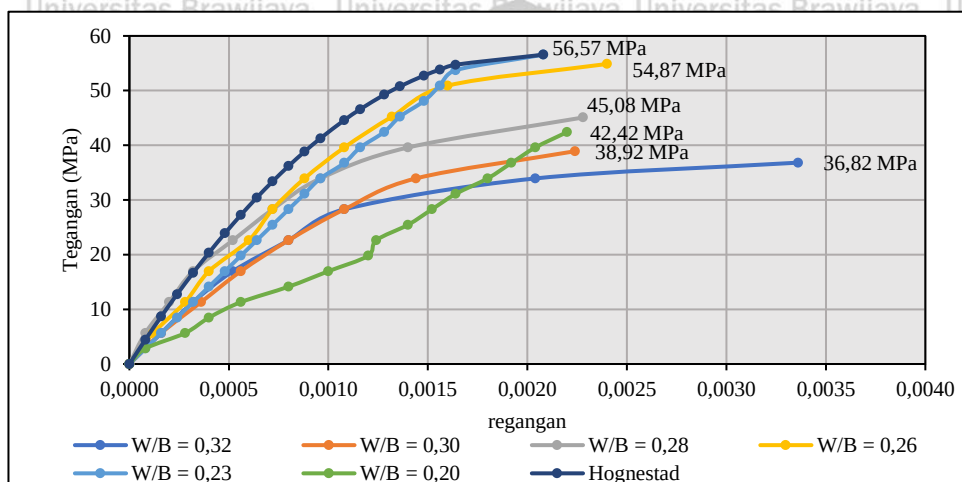
Hasil uji kuat tekan beton kinerja tinggi dihubungkan dengan *W/B ratio* untuk benda uji silinder maupun kubus dan apabila hubungannya dianalisis menggunakan persamaan linier, maka untuk setiap kelompok benda uji dapat dibuat garis hubungan antara perbandingan kadar air dengan bahan pengikat (*W/B ratio*) dengan kuat tekan beton seperti pada Gambar 5.9. Hubungan ini dapat digunakan untuk membuat rencana campuran beton kinerja tinggi dengan metode volume absolut sebagai pelengkap *mix design sheet* pada Gambar 4.2.

Tabel 5. 14 Kuat Tekan Rata-rata Kubus dan Silinder $\phi 10$ cm x 20 cm Beton Kinerja Tinggi

Benda Uji	Kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm		Silinder $\phi 10$ cm x 20 cm	
Umur pengujian	28 hr		28 hr	
	Berat Rata-rata	Kuat Tekan rata-rata	Berat Rata-rata	Kuat Tekan rata-rata
Satuan	kg	Mpa	kg	Mpa
W/B = 0,32	8,65	54,22	3,93	31,61
W/B = 0,30	8,45	51,51	3,95	40,05
W/B = 0,28	8,40	53,33	3,98	45,39
W/B = 0,26	8,60	59,56	3,97	44,55
W/B = 0,23	8,47	71,20	4,03	54,81
W/B = 0,20	8,58	71,56	4,05	43,74

Gambar 5. 9 Hubungan *W/B ratio* dan kuat tekan rata-rata beton kinerja tinggi dengan variasi bentuk dan dimensi benda uji pada umur 28 hari

Pada pengujian kuat tekan benda uji silinder $\phi 15 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$, didapatkan hubungan tegangan-regangan dari pengukuran deformasi aksial menggunakan *ekstensometer* yang terdiri dari 2 buah elemen lingkaran, batang pengunci, batang indikator, dan alat ukur (*dial gauge*). Gambar 5.10 menunjukkan hubungan antara tegangan-regangan aksial beton kinerja tinggi sesuai perbandingan nilai *W/B ratio*. Sebagai pembandingan, ditampilkan pula hubungan tegangan-regangan yang dihitung menggunakan persamaan hognestad $\Phi(\epsilon_c) = f'_c \left[\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right]$ MPa untuk $f'_c = 56,57 \text{ MPa}$ dan nilai regangan beton ϵ_c yang bersesuaian hingga mencapai nilai $\epsilon_0 = 0,02$.



Gambar 5.10 Korelasi tegangan-regangan pada pengujian silinder $\phi 15 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ dengan variasi *W/B ratio* dan perbandingannya dengan hasil analisis persamaan tegangan-regangan Hognestad untuk $f'_c = 56,57 \text{ MPa}$.

Dari hubungan tegangan-regangan pada pengujian variasi *W/B ratio*, diketahui bahwa kuat tekan rata-rata untuk beton kinerja tinggi sebesar 56,57 MPa dengan *W/B ratio* sebesar 0,23 telah memenuhi kriteria beton mutu tinggi (*high strength concrete*) dengan kuat tekan lebih dari 55 MPa (ACI 363.2R-11, 2011) atau beton mutu tinggi kelas I dengan kuat tekan antara 50 MPa hingga 75 MPa (Aïtcin, 2004). Penggunaan nilai *W/B ratio* = 0,23 dinilai paling baik, karena *W/B ratio* tersebut memudahkan pengerjaan pengecoran. Sangat berbeda jika digunakan *W/B ratio* = 0,20 yang menimbulkan kesulitan dalam proses pencetakan, akibat campuran terlalu kekurangan air atau terlalu kering, sehingga mengganggu *workability* campuran beton. Karena proses pencetakan terganggu, mutu beton yang dicapai hanya 42,42 MPa. Hubungan tegangan dan regangan pada *W/B ratio* = 0,20 juga menunjukkan peningkatan kekuatan yang tidak baik, karena berada di bawah benda uji dengan *W/B* = 0,23 hingga *W/B* = 0,28.

Campuran beton kinerja tinggi selanjutnya akan menggunakan *W/B ratio* sebesar 0,23.

Benda uji yang digunakan untuk pemeriksaan kuat tekan adalah silinder $\phi 15$ cm x 30 cm karena masih sesuai dengan kemampuan alat uji yang tersedia.

5.3 Pengaruh Komposisi Silika Fume terhadap Sifat Mekanik Beton Kinerja Tinggi

Pengujian pengaruh komposisi silika fume ditujukan untuk mendapatkan proporsi silika fume yang optimal dalam rangka mengurangi penggunaan semen. Silika fume padat yang dipergunakan memenuhi standard ASTM C 1240-00 dengan spesifikasi seperti terlihat pada Tabel 5.15. Sedangkan kemasan produk dan penampakan butiran silika fume apabila diperbesar menggunakan mikroskop digital adalah seperti terlihat pada Gambar 5.11.

Tabel 5. 15 Spesifikasi Silika Fume

Nama produk	: SikaFume®
Tampilan/Warna	: Bubuk/Abu-abu
Massa Jenis	: 0,60 kg/L
Rekomendasi dosis	: 3% - 10% berat semen

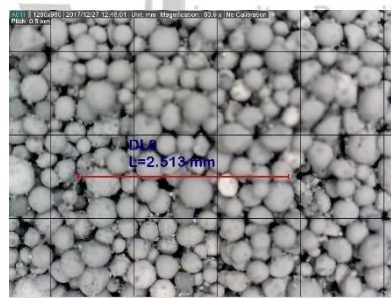
Sumber: (Sika Building Trust, 2016)



(a)



(b)



(c)

Gambar 5. 11 Produk silika fume; (a) Kemasan 20 kg; (b) Hasil penimbangan silika fume; (c) Butiran silika fume yang diperbesar menggunakan mikroskop digital Dino-lite.

Rencana campuran untuk pengujian silika fume disusun dengan *W/B ratio* = 0,23 disusun seperti pada Tabel 5.16. Setiap kali pengadukan dibuat 9 buah benda uji silinder $\phi 15$ cm x 30 cm. Campuran ke-1 (Mix 1) yang tidak mengandung silika fume, atau 100% semen digunakan sebagai kontrol kuat tekan dengan berat semen maksimum dengan kadar silika fume 0%.

Tabel 5. 16 Komposisi Rencana Campuran Beton

Prosentase silika fume		Mix 1	Mix 2	Mix 3	Mix 4
		0,0%	5,0%	10,0%	15,0%
Air	(liter)	119,86	120,14	120,42	120,70
Semen	(kg)	608,70	578,26	547,83	517,39
Silika fume	(kg)	-	30,43	60,87	91,30
Kerikil	(kg)	992,37	992,37	992,37	992,37
Pasir	(kg)	765,68	754,21	742,73	731,25
Superplastisizer	(liter)	12,58	12,58	12,58	12,58

Setelah 1 hari pengecoran, benda uji dikeluarkan dari cetakannya dan direndam dalam bak perendaman selama 7 hari agar proses pengerasan beton terlaksana dengan baik. Khusus benda uji silinder $\phi 15$ cm x 30 cm yang diuji pada umur 7 hari tidak dilakukan perendaman, namun diletakkan dalam ruangan yang tidak terkena panas matahari secara langsung. Pelaksanaan uji kuat tekan benda uji beton kinerja tinggi dengan variasi kadar silika fume terlihat pada Gambar 5.12.



Gambar 5. 12 Pengujian kuat tekan dengan variasi kadar silika fume

5.3.1 Hubungan kadar silika fume dengan kuat tekan

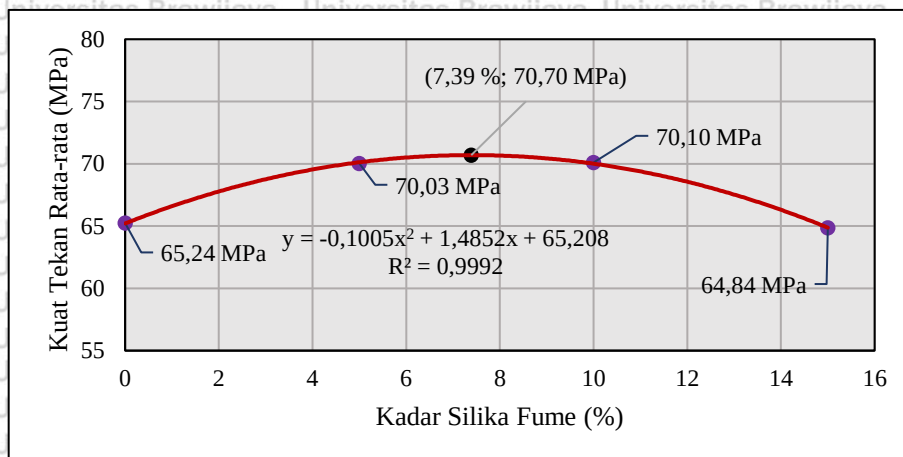
Hasil uji kuat tekan rata-rata dari masing-masing 3 buah silinder beton $\phi 15$ cm x 30 cm yang menggunakan variasi kadar silika fume dapat terlihat pada Tabel 5.17 dan Gambar 5.13.

Tabel 5. 17

Kuat Tekan Rata-rata Silinder Beton $\phi 15$ cm x 30 cm dengan Variasi Kadar Silika Fume

Umur pengujian		7 hr			14 hr			28 hr		
Uraian	Berat	Kuat Tekan	Deformasi	Berat	Kuat Tekan	Deformasi	Berat	Kuat Tekan	Deformasi	
Satuan	kg	Mpa	mm	kg	Mpa	Mm	Kg	Mpa	mm	
SF 0%	13,82	44,33	0,45	13,85	60,68	4,13	65,24	0,49		
SF 5%	13,58	54,02	0,54	13,82	49,91	0,37	4,17	70,03	0,47	
SF 10%	13,53	46,27	0,59	13,65	54,00	0,50	4,12	70,10	0,42	
SF 15%	13,52	44,35	0,75	13,37	44,91	0,59	4,05	64,84	0,50	
Rata-rata	13,63	46,89	0,56	13,66	52,87	0,36	4,11	65,08	0,45	

Pada umur 28 hari terlihat bahwa rata-rata hasil uji kuat tekan berkisar antara 64,84 MPa hingga 70,10 MPa. Hal ini berarti komposisi campuran yang direncanakan dengan menggunakan silika fume dapat memenuhi kriteria beton kinerja tinggi kelas I dengan f_c' antara 50 MPa - 75 MPa. Sementara dari hasil uji deformasi pada usia 28 hari terlihat bahwa pada kadar silika fume antara 5% hingga 10% bisa diperoleh tingkat deformasi yang kecil, yaitu antara 0,47 hingga 0,42.



Gambar 5. 13 Hubungan kuat tekan rata-rata dan kadar silika fume beton kinerja tinggi

Gambar 5.13 menunjukkan rata-rata hasil pengujian kuat tekan 3 buah silinder $\phi 15$ cm x 30 cm. Dengan menggunakan garis kecenderungan (*trendline*) persamaan *polynomial* diperoleh persamaan $y = -0,1005x^2 + 1,4852x + 65,208$ dengan nilai $R^2 = 0,9992$. Untuk mendapatkan kadar optimal, bisa didapat dengan persamaan $dy/dx = 0$ atau $-0,201x + 1,4852 = 0$. Sehingga didapat nilai $x = 7,39\%$ dan nilai kuat tekan optimalnya adalah sebesar $y = -(0,1005 \times 7,39^2) + (1,4852 \times 7,39) + 65,208 = 70,70$ MPa.

Dari perhitungan di atas, untuk mencapai kuat tekan beton kinerja tinggi dengan kategori kuat tekan kelas I dengan f_c' antara (50 MPa - 75 MPa), maka kadar optimal silika fume berdasarkan hasil pengujian adalah berkisar 7,4% dari berat semen, dengan kuat tekan diperkirakan bernilai 70,70 MPa. Apabila ditinjau kembali pada Tabel 5.16, dapat diusulkan bahwa komposisi bahan campuran untuk mendapatkan kuat tekan optimum sebesar 70,70 MPa adalah dengan menggunakan perbandingan Semen PPC: Pasir: Kerikil: Silika Fume: Air: Superplastisizer sebesar 1: 1,328: 1,76: 0,08: 0,213: 0,022. Usulan ini masih memerlukan pengujian-pengujian ulang sesuai ketentuan dalam (ASTM C 39/C39M-03, 2003) dan (SNI 03-6815-2002, 2002) agar dapat diterima kebenarannya secara ilmiah. Namun demikian, untuk praktek pengujian selanjutnya dalam penelitian ini dipergunakan kadar silika fume 10% dari berat semen sesuai dengan dosis maksimum yang disarankan

pada *product data sheet sika fume* (Sika, 2017) dan nilai rata-rata hasil pengujian juga masih berada pada nilai 70,10 MPa.

5.3.2 Berat volume

Dari hasil penimbangan berat masing-masing benda uji beton dihubungkan dengan volume benda uji, bisa diperoleh nilai berat volume benda uji beton sebesar 2.571,84 kg/m³.

Nilai tersebut dipergunakan untuk menghitung kebutuhan bahan dalam proses pengecoran beton selanjutnya.

5.3.3 Modulus elastisitas beton kinerja tinggi

Modulus elastisitas beton serat kinerja tinggi (HPFRC) dapat dihitung dengan persamaan (ACI 363R-10, 2010):

$$E = 3320 \sqrt{f'c} + 6900 \quad (5-1)$$

sebagaimana hasil penelitian Graybeal & Davis (2008) dan Noguchi et al (2009). Nilai E and $f'c$ dinyatakan dalam satuan MPa. Dengan demikian apabila $f'c$ yang direncanakan antara 50 MPa - 75 MPa. maka modulus elastisitas beton E diperkirakan berkisar antara 30.376 MPa - 35.652 MPa. Nilai modulus elastisitas dihitung menggunakan persamaan (ASTM C 469-02, 2002):

$$E = (S_2 - S_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1) \quad (5-2)$$

dengan

E = modulus elastisitas (MPa)

S_2 = tegangan yang terjadi pada saat 40% dari nilai beban ultimit (MPa)

S_1 = tegangan pada saat regangan *longitudinal* ϵ_1 mendekati nilai 0.000050 (MPa)

ϵ_2 = regangan *longitudinal* yang dihasilkan oleh tegangan S_2

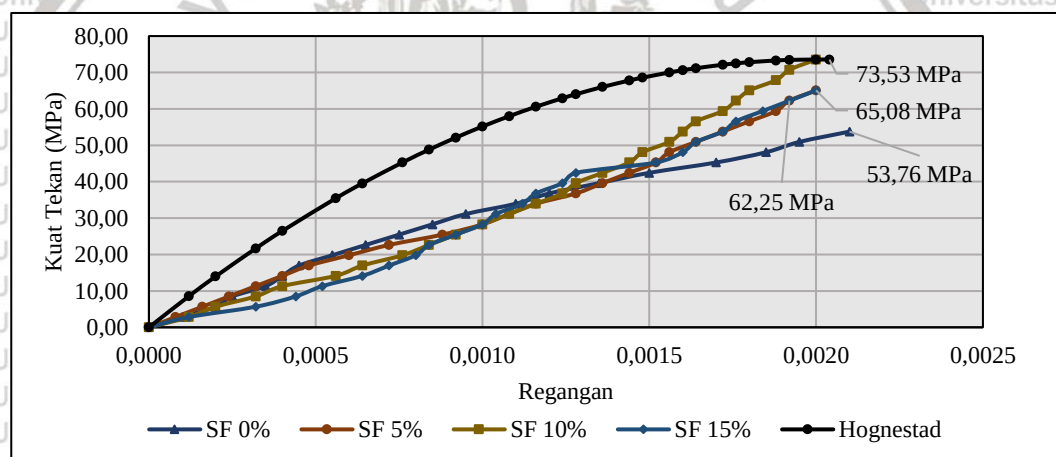
ϵ_1 = 0.000050

Beban ultimit yang dipakai dalam penentuan nilai modulus elastisitas ini diambil pada saat regangan beton mendekati nilai 0.002. atau regangan pada saat beton retak sehingga beban tidak dapat meningkat lagi.

Tabel 5. 18 Modulus Elastisitas Beton Kinerja Tinggi dengan Variasi Silika Fume

Uraian	Tegangan			Regangan			Modulus Elastisitas (E) (MPa)
	ultimit	S_2	S_1	ultimit	ϵ_2	ϵ_1	
	(MPa)	(MPa)	(MPa)				
SF 0%	53,76	21,50	1,41	0,0021	0,0006	0,00005	35.873,02
SF 5%	65,08	26,03	1,77	0,0020	0,0009	0,00005	28.410,17
SF 10%	73,56	29,43	1,18	0,0020	0,0010	0,00005	28.764,82
SF 15%	65,08	26,03	1,18	0,0020	0,0009	0,00005	28.049,38
							30.274,35

Gambar 5.14 menunjukkan hubungan tegangan-regangan yang terjadi pada saat pengujian kuat tekan silinder $\phi 15$ cm x 30 cm sesuai dengan kadar silika fume yang diteliti. Sebagai pembandingan, pada Gambar 5.14 ini juga ditampilkan hubungan tegangan-regangan beton yang disebut sebagai parabola Ritter (Hognestad, 1951) atau juga dikenal sebagai parabola Madrid (Kmiecik & Kaminski, 2011). Selanjutnya dengan menggunakan data pada Tabel 5.18 diketahui bahwa rata-rata nilai modulus elastisitas beton kinerja tinggi dengan variasi kadar silika fume sesuai ASTM C 469-02 (2002) adalah 30.274,35 MPa.



Gambar 5. 14 Hubungan tegangan-regangan beton kinerja tinggi dengan variasi kadar silika fume (SF)

5.4 Pengaruh Komposisi Serat terhadap Sifat Mekanik Beton Serat Kinerja Tinggi

Untuk menguji pengaruh komposisi serat terhadap sifat mekanik beton serat kinerja tinggi ini, dilaksanakan beberapa jenis pengujian pada spesimen beton serat kinerja tinggi sebagai berikut:

1. Uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder $\phi 15$ cm x 30 cm
2. Uji kuat tarik belah beton dengan benda uji silinder $\phi 15$ cm x 30 cm
3. Uji *pullout* dengan benda uji silinder $\phi 15$ cm x 30 cm dengan tulangan berdiameter D-10 mm

4. Uji kuat lentur beton dengan spesimen balok berukuran 15 cm x 15 cm x 60 cm dengan metode *center-point loading*
5. Uji kuat lentur beton dengan spesimen pelat berukuran 5 cm x 15 cm x 60 cm dengan metode *center-point loading*
6. Uji kuat lentur beton dengan spesimen pelat berukuran 5 cm x 15 cm x 60 cm dengan metode *three-point loading*

5.4.1 Pembuatan benda uji

Pembuatan benda uji dimulai dengan penyiapan cetakan benda uji sebagaimana terlihat pada Gambar 5.15. Cetakan yang dipersiapkan adalah untuk berupa cetakan untuk membuat spesimen balok 15 cm x 15 cm x 60 cm, spesimen pelat 5 cm x 15 cm x 60 cm dan beberapa benda uji silinder $\phi 15$ cm x 30 cm, silinder $\phi 10$ cm x 20 cm dan kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm.



Gambar 5. 15 Cetakan spesimen benda uji beton serat kinerja tinggi

Proporsi serat baja pengujian ini bervariasi antara 0,2% hingga 1,4% dari berat volume beton. Serat baja yang dipergunakan adalah jenis *Dramix @3D* dengan spesifikasi sebagaimana tertuang pada Tabel 5.19. Pada Gambar 5.16 diperlihatkan serat baja *Dramix @3D* yang digunakan untuk campuran beton serat kinerja tinggi.

Tabel 5. 19 Spesifikasi Serat *Dramix® 3D*

No.	Uraian	Besaran
1	Tegangan tarik, $R_{m,nom}$	1.225 N/mm ² . Toleransi: + 7,5% Avg
2	Modulus Young's, E	+ 210.000 N/mm ²
3	Panjang (l)	60 mm
4	Diameter (d)	0,75 mm
5	Aspek rasio (l/d)	80
6	Dosis minimum	10 kg/m ³

Sumber: (Bekaert, 2012)



(a)



(b)

Gambar 5. 16 Serat baja untuk campuran beton serat kinerja tinggi; (a) Serat baja *Dramix @3D*; (b) Serat baja dalam kemasan 20 kg ; (c) Superplastisizer.

Superplastisizer yang digunakan pada penelitian ini adalah *Sika® ViscoCrete®-3115 N* yang merupakan larutan encer dari kopolimer polikarboksilat termodifikasi. Superplastisizer ini dikemas dalam jerigen 20 kg. Massa jenis superplastisizer ini adalah $1,05 \pm 0,01$ kg/L. Dosis anjuran untuk penggunaan superplastisizer ini adalah 0,8% - 2,0% dari berat *binder* (campuran semen dan bahan tambahan seperti silika fume). Tampilan superplastisizer ini seperti terlihat pada Gambar 5.17.



(a)



(b)

Gambar 5. 17 Superplastisizer *Sika® ViscoCrete®-3115 N*; (a) dalam kemasan jerigen 20 kg; (b) Hasil penimbangan untuk pengecoran

Beton kinerja tinggi direncanakan dibuat sebanyak 5 komposisi campuran sebagaimana Tabel 5.20. Komposisi tersebut dihitung menggunakan *Mix Design Sheet* pada Gambar L5.1 Lampiran 5. Prosentase serat baja yang digunakan pada pengujian ini adalah 0,2%, 0,4%, 0,6%, 1,0%, dan 1,4% dari berat total campuran.

Tabel 5. 20 Komposisi Bahan Campuran Beton

Kebutuhan Bahan	FRC 1	FRC 2	FRC 3	FRC 4	FRC 5
Prosentase Steel Fiber	0,2%	0,4%	0,6%	1,0%	1,4%
Air (liter)	120,38	120,38	120,38	120,38	120,38
Semen (kg)	547,83	547,83	547,83	547,83	547,83
Silika fume (liter)	60,87	60,87	60,87	60,87	60,87
Kerikil (kg)	992,37	992,37	992,37	992,37	992,37
Pasir (kg)	744,26	744,26	744,26	744,26	744,26
Superplastisizer (liter)	12,58	12,58	12,58	12,58	12,58
Steel Fiber (kg)	4,80	10,00	14,40	24,00	33,60
Berat bahan untuk 1 adukan (kg)	240,21	240,68	241,07	241,92	242,77

Pengecoran dilaksanakan dengan menggunakan mixer beton kapasitas 350 liter. Bahan-bahan yang telah dipersiapkan diletakkan dekat mixer beton. Separuh superplastisizer dicampurkan ke dalam air pencampur. Proses pencampuran dilaksanakan dengan memasukkan kerikil, pasir, dan silika fume ke dalam mixer dan diaduk selama kurang lebih 4 menit. Sesudah itu semen dimasukkan ke dalam mixer dan diaduk selama 3 menit hingga terlihat campuran semen dan agregat menjadi seragam berwarna coklat semen. Sesudah itu air yang sudah bercampur dengan superplastisizer dimasukkan ke dalam mixer dan diaduk selama 3 menit. Selanjutnya sisa superplastisizer dimasukkan ke dalam mixer dan setelah total waktu pengadukan berjalan selama 12 menit, campuran siap untuk dipindahkan ke dalam cetakan beton sebagaimana terlihat pada Gambar 5.15.

Pengecoran beton serat kinerja tinggi dilakukan hingga mendapatkan benda uji seperti pada Tabel 5.21. Pengujian yang dilaksanakan meliputi pengujian lentur spesimen balok 15 cm x 15 cm x 60 cm, pengujian lentur spesimen pelat 5 cm x 15 cm x 60 cm, uji tarik belah silinder $\phi 15$ cm x 30 cm, uji kuat tekan silinder $\phi 15$ cm x 30 cm dan uji tarik cabut silinder $\phi 15$ cm x 30 cm dengan tulangan D-10.

Tabel 5. 21 Spesimen Benda Uji Beton dengan Variasi Komposisi Serat

Komposisi	Spesimen Balok 15 cm x 15 cm x 60 cm	Spesimen pelat 5 cm x 15 cm x 60 cm	silinder $\phi 15$ cm x 30 cm	Silinder Uji Pullout $\phi 15$ cm x 30 cm
FRC-1 (0.2%)	1	2	5	3
FRC-2 (0.4%)	1	2	5	3
FRC-3 (0.6%)	1	2	5	3
FRC-4 (1.0%)	1	2	5	3
FRC-5 (1.4%)	1	2	6	3

Pembukaan cetakan silinder benda uji dilaksanakan pada saat beton telah berumur 1 atau 2 hari dan dilaksanakan perawatan dengan menempatkan benda uji di dalam suhu ruang dan ditutup dengan karung goni yang dibasahi. Sedangkan pembukaan cetakan spesimen benda uji lainnya dilakukan setelah beton mengeras dengan diberi perlakuan menggunakan karung goni basah. Spesimen benda uji yang dibuat dapat dilihat pada Gambar 5.18.



Gambar 5.18 Pembuatan spesimen beton serat kinerja tinggi

5.4.2 Pengujian kuat tekan

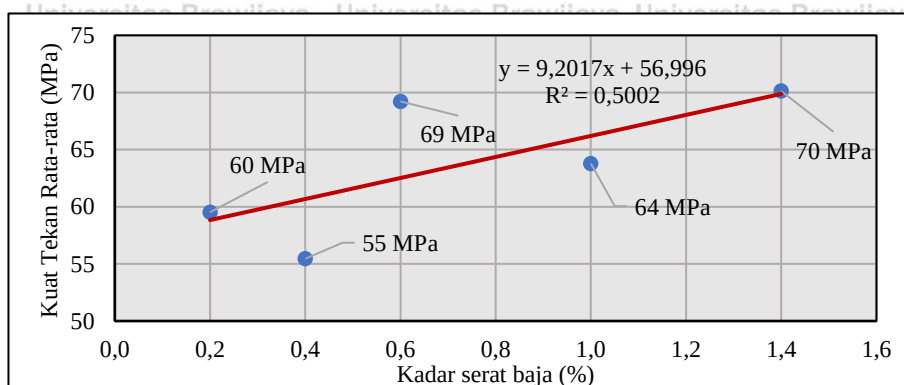
Pengujian kuat tekan beton serat kinerja tinggi dengan variasi kadar serat dilaksanakan menggunakan 3 buah benda uji silinder $\phi 15$ cm x 30 cm. Pengujian dilakukan setelah benda uji berumur 28 hari. Uji kuat tekan dilakukan menggunakan alat *Universal Testing Machine* (UTM) dengan kapasitas 2000 kN yang dilengkapi alat pembaca deformasi *ekstensometer* (Gambar 5.19a). Salah satu model kerusakan yang terjadi pada benda uji silinder $\phi 15$ cm x 30 cm setelah pengujian dapat dilihat pada Gambar 5.19b.



Gambar 5.19 Uji kuat tekan silinder $\phi 15$ cm x 30 cm. a) alat uji UTM, b) Kerusakan benda uji setelah proses pengujian kuat tekan

Hubungan antara kadar serat dan rata-rata kuat tekan dapat dilihat pada Gambar 5.20.

Meskipun dapat dikatakan bahwa penambahan kadar serat dapat meningkatkan kuat tekan beton serat kinerja tinggi dengan persamaan yang memenuhi adalah $y = 9,2017x + 56,996$, namun hubungan ini tidak cukup signifikan, karena nilai R^2 hanya mencapai 0,5002.



Gambar 5. 20 Hubungan kuat tekan rata-rata dan kadar serat baja silinder $\phi 15$ cm x 30 cm

Rata-rata hasil pengujian kuat tekan beserta deformasi aksial dan berat benda uji silinder $\phi 15$ cm x 30 cm dapat disusun sebagaimana terlihat pada Tabel 5.21. Dari data pada Tabel 5.22 dan Gambar 5.20 terlihat bahwa penggunaan komposisi campuran beton serat kinerja tinggi ini telah memenuhi rencana kuat tekan yang diharapkan, yaitu f_c' antara 50 MPa - 75 MPa. Adapun rata-rata kuat tekan yang diperoleh adalah sebesar 63,62 MPa.

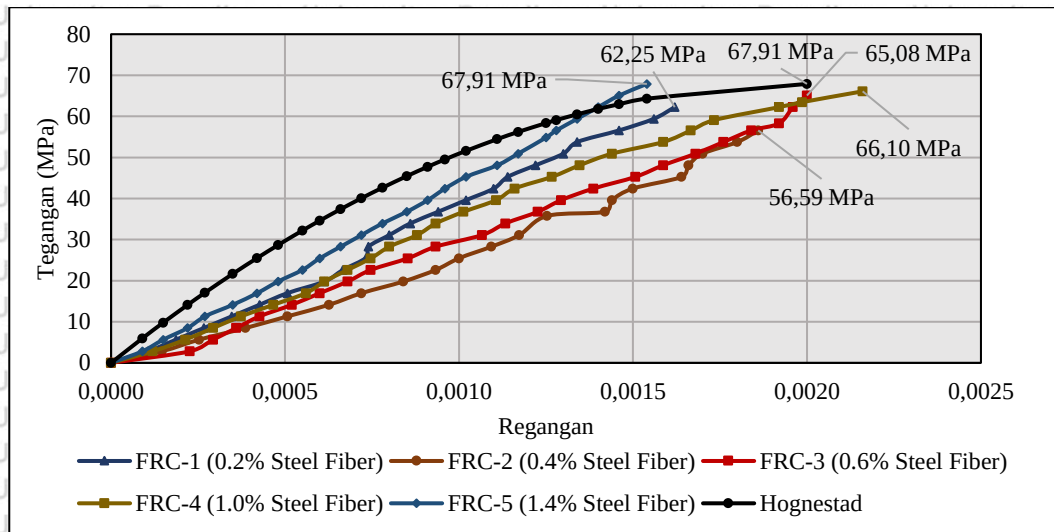
Tabel 5. 22 Rata-rata Hasil Uji Kuat Tekan Silinder $\phi 15$ cm x 30 cm

Benda Uji	Kadar Serat %	Berat kg	Kuat Tekan MPa	Deformasi Aksial mm
FRC 1	0,20	13,40	59,53	0,44
FRC 2	0,40	13,68	55,45	0,44
FRC 3	0,60	13,83	69,22	0,60
FRC 4	1,00	13,70	63,79	0,47
FRC 5	1,40	13,75	70,12	0,38
Rata-rata		13,67	63,62	0,45

5.4.3 Modulus Elastisitas Beton Serat Kinerja Tinggi

Gambar 5.21 memperlihatkan hubungan tegangan-regangan beton serata kinerja tinggi dengan variasi kadar serat. Diagram teoritis dengan persamaan Hognestad juga digambarkan sebagai pembanding. Dengan mengacu pada kuat tekan rata-rata yang tertuang dalam Tabel 5.22, selanjutnya data hasil pengukuran deformasi aksial pada pengujian kuat tekan ditentukan nilai tegangan ultimit untuk masing-masing komposisi serat untuk digunakan menghitung nilai modulus elastisitas beton serat kinerja tinggi. Beban ultimit yang dipakai

dalam penentuan nilai modulus elastisitas ini diambil berdasarkan kuat tekan beton rata-rata dengan nilai regangan beton mendekati 0,0002.



Gambar 5. 21 Hubungan tegangan-regangan beton serat kinerja tinggi pada benda uji silinder $\phi 15$ cm x 30 cm dengan variasi kadar serat baja.

Nilai modulus elastisitas dihitung menggunakan persamaan (ASTM C 469-02. 2002):

$$E = (S_2 - S_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1) \quad (5-3)$$

dengan

E = modulus elastisitas (MPa)

S_2 = tegangan yang terjadi pada saat 40% dari nilai beban ultimit (MPa)

S_1 = tegangan pada saat regangan *longitudinal* ϵ_1 mendekati nilai 0.000050 (MPa)

ϵ_2 = regangan *longitudinal* yang dihasilkan oleh tegangan S_2

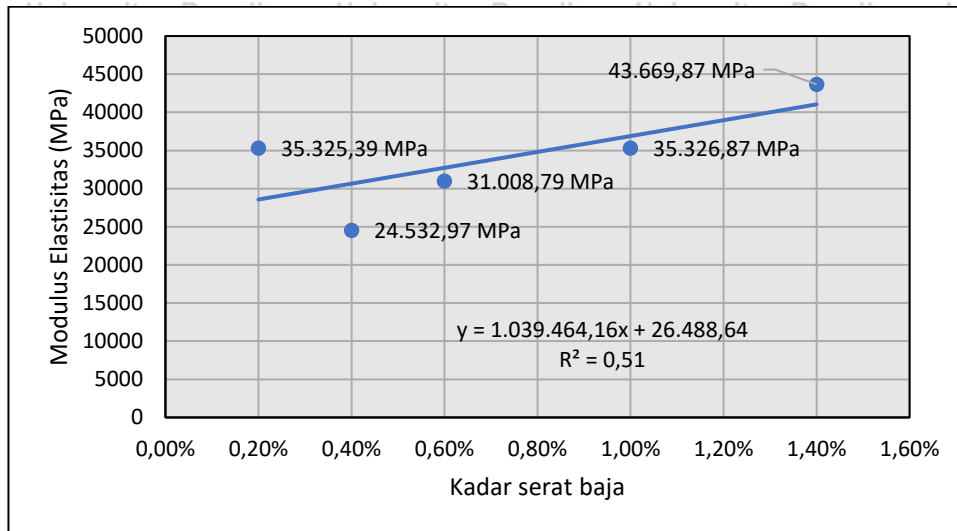
$\epsilon_1 = 0.000050$

Hasil perhitungan modulus elastisitas beton serat kinerja tinggi dengan variasi kadar serat baja dapat dilihat pada Tabel 5.23.

Tabel 5. 23 Modulus Elastisitas Beton Kinerja Tinggi dengan Variasi kadar serat baja

Uraian	Tegangan			Regangan			Modulus Elastisitas (E) (MPa)
	ultimit	S_2	S_1	ultimit	ϵ_2	ϵ_1	
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	-	-	-	(MPa)
FRC-1 (0,2%)	62,25	24,90	1,33	0,0016	0,0007	0,00005	35.325,39
FRC-2 (0,4%)	56,59	22,64	0,96	0,0019	0,0009	0,00005	24.532,97
FRC-3 (0,6%)	65,08	26,03	0,62	0,0020	0,0009	0,00005	31.008,79
FRC-4 (1,0%)	66,10	26,44	1,18	0,0022	0,0008	0,00005	35.326,87
FRC-5 (1,4%)	67,91	27,16	1,57	0,0015	0,0006	0,00005	43.669,87

Selanjutnya hubungan antara variasi kadar serat dengan modulus elastisitas beton serat kinerja tinggi dapat disusun dalam bentuk diagram sebagaimana terlihat pada Gambar 5.22. Persamaan yang diperoleh dari hubungan ini adalah $y = 1039464,16x + 26488,64$ dengan nilai $R^2 = 0,51$. Dapat dikatakan bahwa penambahan kadar serat baja berpengaruh terhadap peningkatan nilai modulus elastisitas beton serat kinerja tinggi.



Gambar 5. 22 Hubungan modulus elastisitas dan kadar serat baja pada uji kuat tekan benda uji silinder $\phi 15$ cm x 30 cm

5.4.4 Pengujian kuat tarik belah

Kuat tarik belah adalah nilai kuat tarik tidak langsung dari benda uji beton berbentuk silinder yang diperoleh dari hasil pembebanan benda uji yang diletakkan mendatar sejajar dengan permukaan meja penekan mesin uji tekan. Peralatan untuk pengujiannya meliputi mesin uji tekan, pelat atau batang penekan tambahan, dan bantalan bantu pembebanan sebagaimana terlihat pada Gambar 5.23. Kuat Tarik belah dari benda uji dihitung dengan persamaan berikut (SNI 03-2491-2002, 2002):

$$F_{ct} = \frac{2P}{\pi LD} \quad (5-4)$$

F_{ct} = kuat Tarik-belah dalam MPa

P = beban uji maksimum (beban belah/hancur) dalam newton (N) yang ditunjukkan mesin uji tekan.

L = Panjang benda uji dalam mm.

D = diameter benda uji dalam mm



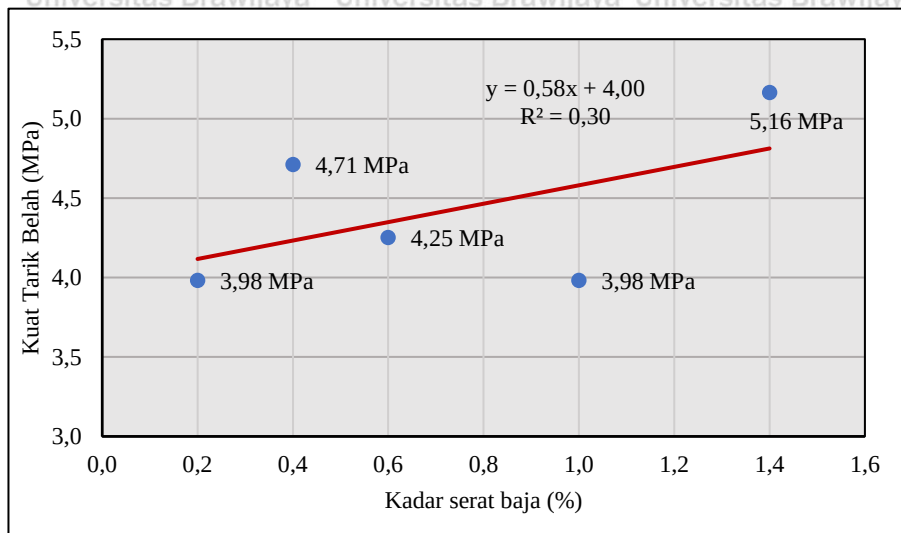
Gambar 5. 23 Uji tarik belah silinder beton kinerja tinggi

Hasil uji kuat tarik belah silinder $\phi 15 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ untuk pengujian spesimen benda uji beton serat kinerja tinggi dengan variasi kadar serat dapat dilihat pada Tabel 5.24. Berat masing-masing benda uji juga dicatat. Dari hasil uji kuat tarik-belah silinder beton serat kinerja tinggi ini diketahui bahwa nilai kuat tarik-belah rata-rata yang diperoleh adalah sebesar 4,42 MPa.

Tabel 5. 24 Hasil Uji Kuat Tarik Belah Spesimen HPFRC

Benda Uji	Kadar serat %	Berat kg	Kuat tarik belah MPa
FRC 1	0,20	13,38	3,98
FRC 2	0,40	13,48	4,71
FRC 3	0,60	13,58	4,25
FRC 4	1,00	13,53	3,98
FRC 5	1,40	13,58	5,16
Rata-rata		13,51	4,42

Gambar 5.24 memperlihatkan hubungan antara kadar serat baja dengan kuat tarik-belah masing-masing benda uji. Dari hubungan tersebut didapat persamaan hubungan kuat tarik belah dengan persamaan $y = 0,58x + 4,00$. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan kadar serat dapat meningkatkan kuat tarik belah beton serat kinerja tinggi. Namun apabila dilihat nilai $R^2 = 0,30$ dapat dikatakan bahwa persamaan tersebut masih kurang signifikan.



Gambar 5. 24 Hubungan kuat tarik belah dan kadar serat baja

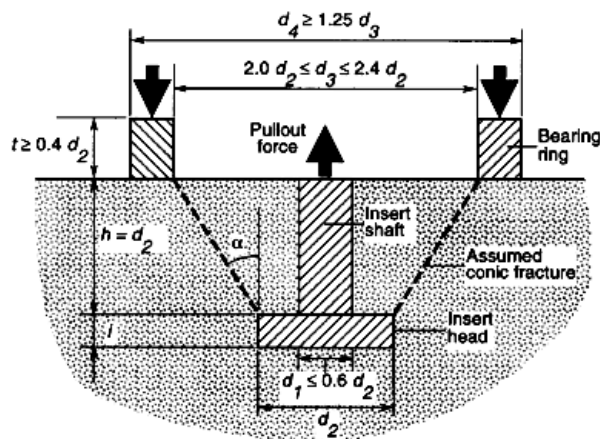
5.4.5 Pengujian kuat tarik cabut (*pullout test*)

Penentuan kuat tarik cabut beton serat kinerja tinggi dilakukan dengan mengukur gaya yang dibutuhkan untuk menarik logam yang tertanam dalam spesimen uji silinder beton melalui proses pengecoran langsung. Kuat tarik cabut dapat dikaitkan dengan hasil uji kuat tekan. Hubungan ini bergantung pada konfigurasi penanaman, dimensi ring tumpuan, kedalaman penanaman, dan tingkat perkembangan kekuatan beton (ASTM C 900-01, 2001).

Pengujian kuat tarik cabut dilaksanakan dengan menggunakan benda uji silinder $\phi 15 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ yang diberi baja tulangan D-10 di tengahnya sebagaimana terlihat pada Gambar 5.25.



Gambar 5. 25 Uji tarik cabut (*Pullout Test*) silinder beton serat kinerja tinggi



Gambar 5. 26 Skematik penampang melintang uji tarik cabut (Pullout test)
Sumber: ASTM C 900-01, 2001

Tegangan normal nominal pada permukaan fraktur kerucut dihitung dengan membagi gaya penarikan oleh area *frustum* dan dikalikan dengan sinus setengah sudut *apex* (lihat Gambar 5.26). Gunakan persamaan:

$$f_n = (P/A) \sin \alpha \quad (5-5)$$

$$\sin \alpha = (d_3 - d_2)/2S \quad (5-6)$$

$$A = \pi S (d_3 - d_2)/2 \quad (5-7)$$

$$S = \sqrt{h^2 + ((d_3 - d_2)/2)^2} \quad (5-8)$$

dengan:

f_n = nominal tegangan normal, MPa,

P = gaya *pullout*, N,

α = 1/2 sudut *apex frustum*, atau $\tan^{-1} (d_3 - d_2)/2h$,

A = luas permukaan fraktur, mm^2 ,

d_2 = diameter kepala masukan *pullout*, mm,

d_3 = diameter dalam cincin bantalan atau diameter basis besar *conic frustum*, mm,

h = ketinggian *conic frustum*, dari kepala masukan ke permukaan basis besar, mm,

S = ketinggian miring dari *frustum*, mm

Perhitungan di atas memberikan nilai rata-rata tekanan normal pada permukaan kegagalan. Karena keadaan tegangan pada *konic frustum* tidak seragam, tegangan normal yang dihitung adalah nilai fiktif. Perhitungan tegangan normal berguna pada saat membandingkan kekuatan tarik cabut (*pullout strengths*) yang diperoleh dengan geometri uji yang berbeda yang jatuh dalam batas-batas metode uji ini. Pada uji tarik cabut ini silinder

$\phi 15 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ menggunakan tulangan *D-10* yang di tanam, nilai-nilai yang diperhitungkan adalah:

$$d_3 = 120 \text{ mm}, d_2 = 10 \text{ mm}, h = 10 \text{ mm},$$

$$S = \sqrt{10^2 + ((120 - 10)/2)^2} = 56 \text{ mm},$$

$$A = \pi \cdot 56 \cdot \frac{(120-10)}{2} = 9.663 \text{ mm}^2,$$

$$\sin \alpha = \frac{(d_3 - d_2)}{2S} = \frac{(120-10)}{2 \cdot 56} = 0,98,$$

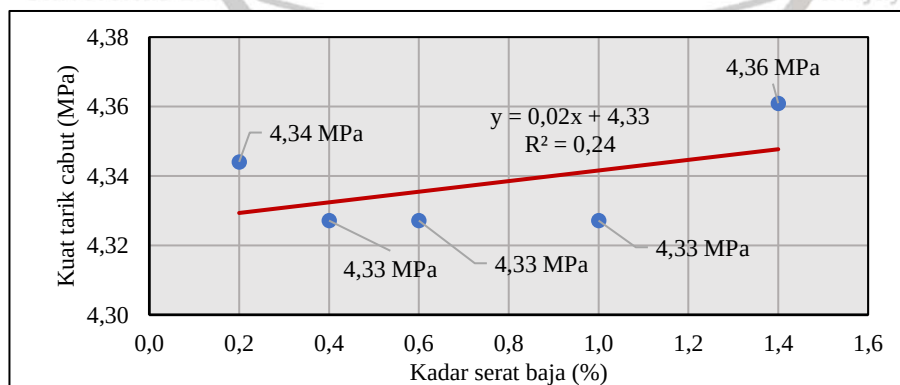
$$f_n = (P/A) \sin \alpha = (0,98 P / 9.663)$$

Dari pengujian 3 buah benda uji dapat diperoleh rata-rata berat benda uji dan rata-rata nilai kuat tarik cabut (*Pullout strength*) sebagaimana terlihat pada Tabel 5.25. Dari pengujian diketahui kuat tarik cabut beton kinerja tinggi yang digunakan ini adalah sebesar 4,34 MPa.

Tabel 5. 25 Kuat Tarik Cabut (*Pullout Test*) Tulangan *D-10*

Benda uji	Kadar serat	Berat kg	Kuat Tarik cabut MPa
FRC 1	0,20%	13,48	4,34
FRC 2	0,40%	13,78	4,33
FRC 3	0,60%	13,70	4,33
FRC 4	1,00%	13,77	4,33
FRC 5	1,40%	13,67	4,36
Rata-rata		13,68	4,34

Apabila data kuat tarik cabut pada Tabel 5.25 dihubungkan dengan kadar serat masing-masing pengujian, maka dapat diperoleh hubungan dengan persamaan $y = 0,02x + 4,33$ dengan nilai $R^2 = 0,24$. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan kadar serat tidak cukup berpengaruh terhadap lekatan antara beton dan baja tulangan, karena peningkatan nilainya sangat kecil atau cenderung datar sebagaimana terlihat pada persamaan yang didapatkan.



Gambar 5.27 Hubungan kuat tarik cabut (*pullout*) tulangan *D-10* dan kadar serat baja

5.4.6 Pengujian lentur spesimen balok

Kuat lentur adalah nilai tegangan tarik yang dihasilkan dari momen lentur dibagi dengan momen penahan penampang balok uji. Kuat lentur dihitung menggunakan persamaan berikut (SNI 03-4154-1996, 1996):

$$f_{lt} = \frac{3pl}{2bd^2} \quad (5-9)$$

Keterangan :

f_{lt} = kuat lentur dalam MPa

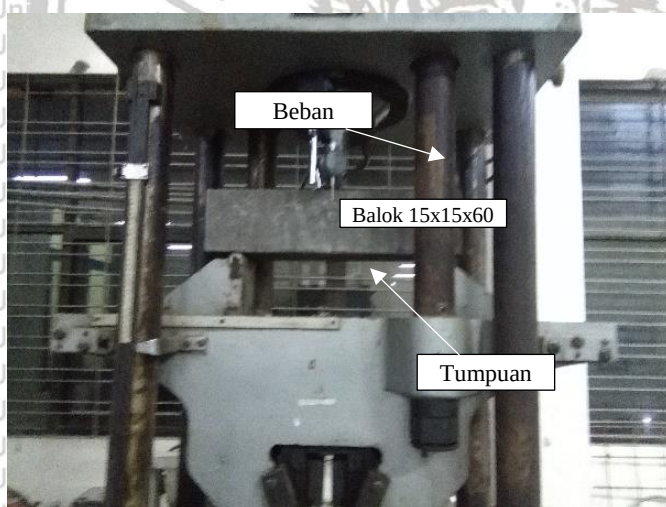
p = beban maksimum yang mengakibatkan keruntuhan balok uji, dalam newton.

l = panjang bentang diantara kedua balok tumpuan, dalam mm

b = lebar balok rata-rata pada penampang runtuh, dalam mm

d = tinggi balok rata-rata pada penampang runtuh, dalam mm.

Pengujian kuat lentur spesimen balok ini dilaksanakan dengan menggunakan UTM (*Universal Testing Machine*) berkapasitas 200 kN seperti terlihat pada Gambar 5.28. Sedangkan untuk mengetahui lendutan yang terjadi digunakan *dial gauge*.



Gambar 5.28 Pengujian lentur balok dengan metode *center-point loading*

Hasil uji lentur dapat dilihat pada Tabel 5.26. Kuat lentur spesimen balok beton serat kinerja tinggi memiliki nilai antara 6,30 MPa hingga 8,30 MPa. Apabila diambil nilai rata-ratanya, maka kuat lentur balok beton serat kinerja tinggi adalah sebesar 7,20 MPa.

Tabel 5. 26 Kuat Lentur Balok 15 cm x 15cm x 60 cm

Benda Uji	Kadar serat %	Berat kg	Kuat Lentur kN	MPa	Lendutan mm
FRC 1	0,20	33,55	41,50	8,30	2,37
FRC 2	0,40	33,70	34,00	6,80	3,57
FRC 3	0,60	33,25	36,00	7,20	2,42
FRC 4	1,00	34,80	37,00	7,40	0,81
FRC 5	1,40	34,35	31,50	6,30	6,09
Rata-rata		33,93	36,00	7,20	3,05

5.4.7 Pengujian lentur spesimen pelat

Serupa dengan pengujian lentur spesimen balok, maka pada pengujian lentur spesimen pelat yang diuji dengan metode *center-point loading* ini, persamaan yang dipergunakan mengacu pada (SNI 03-4154-1996, 1996) sebagai berikut:

$$f_{lt} = \frac{3pl}{2bd^2} \quad (5-10)$$



Gambar 5. 29 Setting pengujian lentur spesimen pelat dengan metode *center-point loading*

Untuk pengujian lentur benda uji FRC 1 dan FRC 2, pelaksanaan pengujian menggunakan alat UTM dengan kapasitas 200 kN atau 20 ton dan pencatatan deformasi menggunakan dial gauge. Karena pembacaan data pembebanan kurang memuaskan, maka pengujian benda uji FRC 3 hingga FRC 5 selanjutnya menggunakan frame uji secara manual dengan pembebanan menggunakan dongkrak berkapasitas 20 ton beserta *Load Cell* berkapasitas 20 ton dan pengukuran lendutan dilaksanakan menggunakan LVDT. Pelaksanaan pengujian lentur dengan menggunakan frame uji dapat dilihat pada Gambar 5.30. Hasil pengujian yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 5.27. Kuat lentur spesimen pelat yang diuji dengan metode *center-point loading* berkisar antara 6,30 MPa hingga 9,31 MPa. Sedang rata-ratanya adalah 7,84 MPa.

Tabel 5. 27 Kuat Lentur Spesimen Pelat dengan Metode *Center-Point Loading*

Benda Uji		Kuat Lentur		Lendutan
		Berat Kg	kN MPa	
FRC 1	0,20%	11,05	3,50 6,300	2,50
FRC 2	0,40%	11,20	3,50 6,300	3,59
FRC 3	0,60%	11,25	4,98 8,964	0,91
FRC 4	1,00%	11,25	5,17 9,306	2,23
FRC 5	1,40%	11,30	4,63 8,334	1,51
Rata-rata		11,21	4,36 7,841	2,15

Spesimen pelat juga diuji dengan mempergunakan metode *Three-Point Loading* sebagaimana terlihat pada Gambar 5.30. Rumus-rumus perhitungan yang digunakan untuk pengujian di mana bidang patah terletak di daerah pusat (daerah 1/3 jarak titik perletakan bagian tengah), maka kuat lentur beton dihitung menurut persamaan (SNI 4431:2011, 2011):

$$f_{lt} = \frac{P \cdot L}{b \cdot h^2} \quad (5-11)$$

Dengan:

f_{lt} = kuat lentur benda uji (MPa)

P = beban tertinggi yang terbaca pada mesin uji

L = jarak (bentang) antara dua garis perletakan (mm)

b = lebar tampang lintang patah arah horizontal (mm)

h = lebar tampang lintang patah arah vertikal (mm)

Tabel 5. 28 Kuat Lentur Spesimen Pelat dengan Metode *Three-Point Loading*

Benda Uji		Berat	Kuat Lentur		Lendutan
		kg	kN	MPa	mm
FRC 1	0,20%	10,85	6,62	7,94	1,06
FRC 2	0,40%	11,30	6,33	7,60	1,17
FRC 3	0,60%	11,25	6,37	7,64	1,60
FRC 4	1,00%	11,25	6,53	7,84	2,10
FRC 5	1,40%	11,45	5,29	6,35	1,65
Rata-rata		11,22	6,23	7,47	1,52

Hasil uji kuat lentur spesimen pelat dengan metode *Three-Point Loading* dapat dilihat pada Tabel 5.28. Nilai kuat lenturnya berkisar antara 6,35 MPa hingga 7,94 MPa. Rata-rata kuat lenturnya adalah 7,47 MPa. Dari hasil uji kuat lentur spesimen balok dan uji kuat lentur spesimen pelat terlihat bahwa nilai kuat lentur juga dipengaruhi oleh bentuk geometri benda uji. Nilai kuat lentur yang diperoleh dari hasil uji spesimen pelat memiliki nilai rata-rata yang lebih besar dibandingkan pengujian dengan spesimen balok. Namun demikian, karena aturan standar yang berlaku tentang kuat lentur yang banyak digunakan dalam analisis beton

adalah menggunakan spesimen balok dengan dimensi 15 cm x 15 cm x 60 cm, maka nilai kuat lentur yang selanjutnya akan dipergunakan adalah yang didasarkan atas pengujian spesimen balok.



Gambar 5.30 Setting pengujian lentur spesimen pelat dengan metode *three-point loading*

5.4.8 Berat Volume Beton Serat Kinerja Tinggi

Berat volume benda uji beton serat kinerja tinggi dihitung menggunakan benda uji silinder pada pengujian tekan dan pengujian tarik belah. Hasil perhitungan berat volume dapat dilihat pada Tabel 5.29. Rata-rata berat volume beton serat kinerja tinggi dari hasil pengujian ini adalah sebesar 2.589,52 kg/m³.

Tabel 5. 29 Berat Volume Beton Serat Kinerja Tinggi dengan Variasi Kadar Serat Baja

Benda Uji		Satuan	Uji tekan		Uji Tarik belah	
			Silinder ϕ10 cm x 20 cm	Silinder ϕ15 cm x 30 cm	Silinder ϕ15 cm x 30 cm	Rata-rata
FRC 1	0,20%	Kg/m ³	2.663,19	2.527,62	2.522,90	2.571,24
FRC 2	0,40%	Kg/m ³	2.663,19	2.581,06	2.541,76	2.595,34
FRC 3	0,60%	Kg/m ³	2.641,97	2.609,36	2.560,63	2.603,99
FRC 4	1,00%	Kg/m ³	2.620,75	2.584,20	2.551,19	2.585,38
FRC 5	1,40%	Kg/m ³	2.620,75	2.593,64	2.560,63	2.591,67
Rata-rata		Kg/m ³	2.641,97	2.579,17	2.547,42	2.589,52

5.5 Karakteristik Beton Serat Kinerja Tinggi untuk Pelat Satu Arah

Untuk melakukan uji lentur pelat beton serat kinerja tinggi ini dilaksanakan serangkaian pengujian yang meliputi:

1. Uji tarik baja tulangan $D-10$ dan $\phi 8$
2. Uji kuat tekan silinder $\phi 15 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$
3. Uji tarik belah silinder $\phi 15 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$
4. Uji tarik cabut silinder $\phi 15 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ dengan tulangan $\phi 8$.
5. Uji lentur pelat dengan bentang $1,6 \text{ m}$ dan tebal 8 cm , lebar 90 cm .

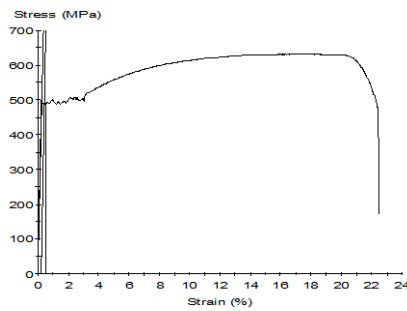
5.5.1 Uji tarik baja tulangan

Pengujian tarik baja tulangan dilakukan untuk mengetahui nilai kuat tarik baja tulangan pelat beton dan untuk mengetahui nilai modulus elastisitas (E) baja tulangan. Pengujian dilaksanakan menggunakan *Static-Hydraulic Universal Test Systems* dengan program *TestWorks 4 Versi 4.12 D Build 1013* dari *MTS Systems Corporation* sebagaimana terlihat pada Gambar 5.31.

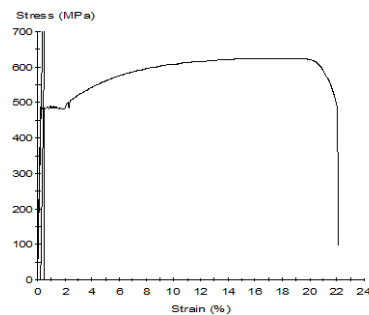


Gambar 5. 31 Uji tarik baja tulangan dengan alat *Static-Hydraulic Universal Test Systems* MTS.

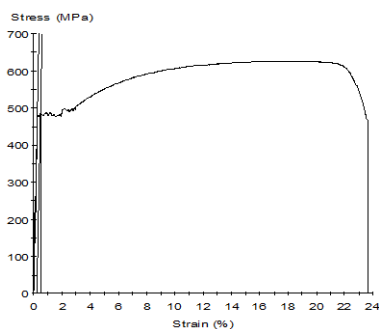
Pengujian dilakukan terhadap baja tulangan deform $D-10$ dan tulangan polos $\phi 8$ dengan panjang 50 cm . masing-masing sebanyak 3 batang. Diameter tulangan baja dihitung berdasarkan berat dan volume. Untuk tulangan $D-10$ diperoleh diameter $9,73 \text{ mm}$. sedangkan untuk tulangan $\phi 8$ diameternya adalah $6,41 \text{ mm}$. Rincian hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.30 dan Gambar 5.32.



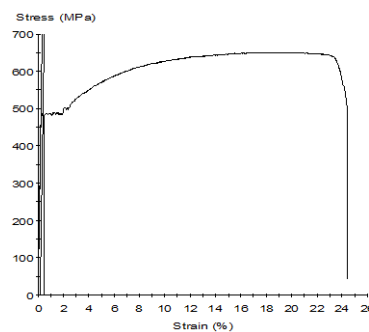
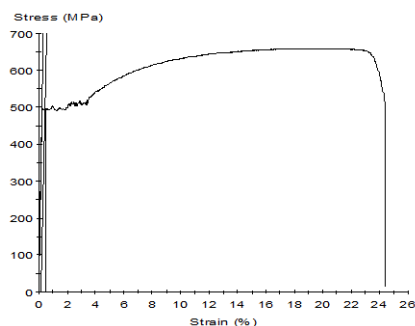
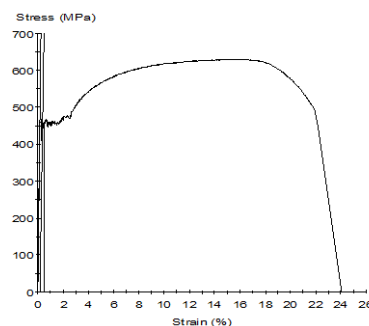
a. Diagram uji tarik besi D-10



b. Diagram uji tarik besi D-10



c. Diagram uji tarik besi D-10

d. Diagram uji tarik besi ϕ -8e. Diagram uji tarik besi ϕ -8f. Diagram uji tarik besi ϕ -8

Gambar 5.32 Hasil uji tarik baja tulangan.

Dari hasil pengujian dapat diketahui bahwa rata-rata kuat leleh (*yield strength*) baja tulangan deform D-10 adalah sebesar 459,37 MPa dengan modulus elastisitas 199.182,32 MPa. Sedangkan rata-rata kuat leleh baja tulangan polos ϕ -8 adalah sebesar 450,63 MPa dengan modulus elastisitas 224.171,26 MPa.

Tabel 5. 30 Hasil Uji Tarik Baja Tulangan D-10 dan ϕ -8

Spesimen	Dia meter	Final Gage Length (Lu)	Final Dia meter	Modulus Elastisitas (E)	Tensile Strength (Rm)	Lower Yield Strength (ReL)	Upper Yield Strength (ReH)
	mm	mm	mm	MPa	MPa	MPa	MPa
1	9,73	247	6,50	191.791,27	650,17	477,21	493,13
2	9,71	243	6,40	206.483,23	658,96	493,14	505,38
3	9,74	245	7,00	199.272,46	628,68	407,77	467,25
Rerata	9,73	245	6,63	199.182,32	645,94	459,37	488,59
1	6,41	246	4,40	223.563,19	589,79	445,29	453,58
2	6,42	248	4,70	200.858,85	597,07	455,53	464,06
3	6,41	242	3,85	248.091,73	588,79	451,06	453,94
Rerata	6,41	245,33	4,32	224.171,26	591,88	450,63	458,86

5.5.2 Pembuatan benda uji pelat HPFRC satu arah

Benda Uji Pelat 80 mm x 900 mm x 2000 mm dibuat sebanyak 4 buah dengan mutu HPFRC rencana f_c' di atas 50 MPa menggunakan variasi komposisi serat sebagaimana terlihat pada Tabel 5.31.

Tabel 5. 31 Komposisi Campuran Beton HPFRC

Kebutuhan Bahan		HPFRC-1	HPFRC-2	HPFRC-3	HPFRC-4
Prosentase Steel Fiber		0,4%	0,6%	0,8%	1,0%
Air	(liter)	120,38	120,38	120,38	120,38
Semen	(kg)	547,83	547,83	547,83	547,83
Silika fume	(liter)	60,87	60,87	60,87	60,87
Kerikil	(kg)	992,37	992,37	992,37	992,37
Pasir	(kg)	744,26	744,26	744,26	744,26
Superplastisizer	(liter)	12,58	12,58	12,58	12,58
Serat baja	(kg)	10,00	14,40	19,20	24,00

Bersamaan dengan pengecoran pelat juga dibuat benda uji silinder dengan jumlah sebagaimana tertuang pada Tabel 5.32.

Tabel 5. 32 Benda Uji Beton Serat Kinerja Tinggi dengan Variasi Kadar Serat baja

Komposisi	Pelat 8 cm x 90 cm x 200 cm	silinder ϕ 15 cm x 30 cm	Silinder Pullout ϕ 15 cm x 30 cm
HPFRC-1 (0.4%)	1	6	1
HPFRC-2 (0.6%)	1	4	1
HPFRC-3 (0.8%)	1	5	1
HPFRC-4 (1.0%)	1	5	1

Pengecoran pelat HPFRC dilaksanakan dengan sistem *Self Compacting Concrete* (SCC) dan dibantu dengan alat penggetar sebagaimana terlihat pada Gambar 5.33. Pencetakan benda uji pelat dilakukan di ruang laboratorium.



Gambar 5.33 Pengecoran benda uji pelat

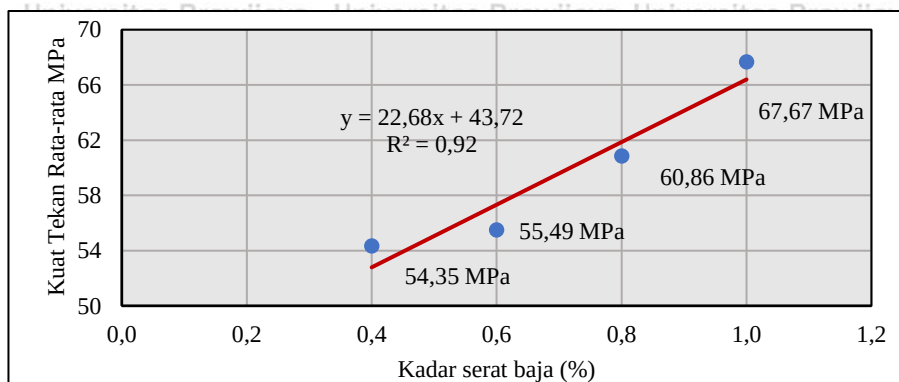
5.5.3 Pengujian kuat tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan terhadap benda uji silinder $\phi 15$ cm x 30 cm sebanyak 3 benda uji. Pengujian meliputi penimbangan benda uji dan pembacaan besarnya beban yang dapat ditahan oleh silinder. Tabel 5.33. menunjukkan hasil pengujian kuat tekan rata-rata untuk 3 buah benda uji silinder $\phi 15$ cm x 20 cm.

Tabel 5. 33 Kuat Tekan Rata-rata 3 buah Silinder $\phi 15$ cm x 30 cm

Benda Uji	Kadar serat %	Berat Kg	Kuat tekan MPa	Deformasi Aksial mm
HPFRC 1	0,40	13,51	54,35	0,40
HPFRC 2	0,60	13,50	56,59	0,50
HPFRC 3	0,80	13,62	62,25	0,64
HPFRC 4	1,00	13,65	67,91	0,68
Rata-rata		13,54	61,69	0,58

Hasil pengujian pada Gambar 5.34 menunjukkan bahwa variasi kadar serat memberikan pengaruh terhadap kuat tekan beton apabila ditinjau kuat tekan dari kadar 0,4% hingga 1,0% yang menunjukkan pola kenaikan kuat tekan. Persamaan $y = 22,68x + 43,72$ dengan nilai $R^2 = 0,92$ menunjukkan korelasi yang baik antara kadar serat dengan kuat tekan beton.



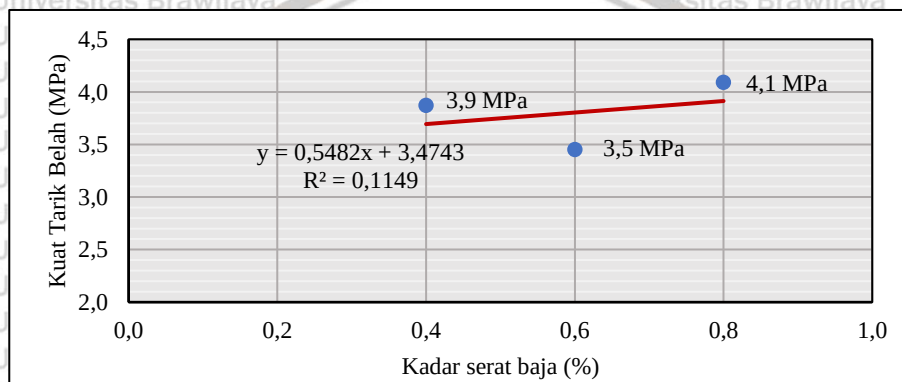
Gambar 5. 34 Hubungan kuat tekan rata-rata dan kadar serat baja

5.5.4 Pengujian kuat tarik belah

Hasil pengujian kuat Tarik belah untuk benda uji silinder $\phi 15$ cm x 30 cm dengan komposisi campuran yang digunakan untuk pengecoran pelat dapat dilihat pada Tabel 5.34 dan Gambar 5.35.

Tabel 5. 34 Kuat Tarik Belah Pelat HPFRC

Benda Uji	Kadar serat %	Berat kg	Kuat Tarik Belah MPa
HPFRC 1	0,40	13,43	3,87
HPFRC 2	0,60	13,28	3,45
HPFRC 3	0,80	13,45	4,09
Rata-rata		13,32	3,48

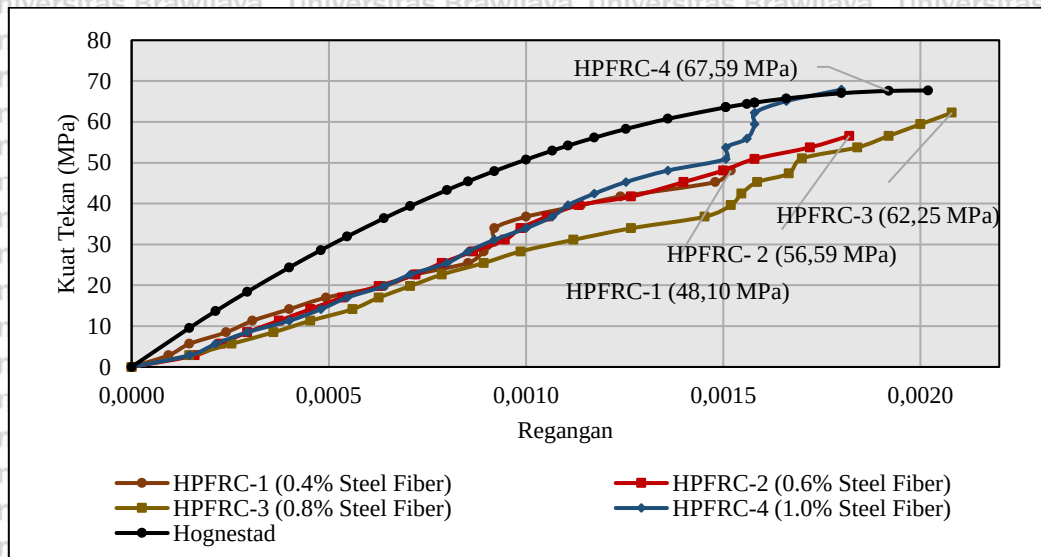


Gambar 5.35 Hubungan kuat tarik belah dan kadar serat baja

Gambar 5.35 menunjukkan bahwa kadar serat baja tidak cukup signifikan memberikan pengaruh terhadap kuat tarik belah benda uji silinder HPFRC. Hal ini terlihat dari rentang nilai kuat tarik belah yang berkisar antara 3,5 MPa hingga 4,1 MPa, namun perilakunya tidak menunjukkan pola penambahan kekuatan yang cukup signifikan. Hal ini sangat dimungkinkan akibat proses pengambilan sampel benda uji yang kurang tepat.

5.5.5 Modulus Elastisitas

Pada saat dilakukan uji kuat tekan beton untuk menentukan karakteristik beton kinerja tinggi untuk pelat HPFRC, dilaksanakan pula pembacaan deformasi yang terjadi pada benda uji silinder $\phi 15$ cm x 30 cm. Hasil pembacaan deformasi tersebut dituangkan dalam diagram tegangan-regangan beton serat kinerja tinggi sebagaimana terlihat pada Gambar 5.36. Pada diagram tegangan-regangan ini disertakan pula diagram tegangan regangan menurut persamaan Hognestad dengan kuat tekan rencana 67,59 MPa.



Gambar 5. 36 Hubungan tegangan-regangan beton serat kinerja tinggi untuk pengujian pelat dengan variasi kadar serat

Nilai modulus elastisitas dihitung menggunakan persamaan (ASTM C 469-02, 2002):

$$E = (S_2 - S_1)/(\epsilon_2 - \epsilon_1) \quad (5-12)$$

dengan

E = modulus elastisitas (MPa)

S_2 = tegangan yang terjadi pada saat 40% dari nilai beban ultimit (MPa)

S_1 = tegangan pada saat regangan *longitudinal* ϵ_1 mendekati nilai 0.000050 (MPa).

ϵ_2 = regangan *longitudinal* yang dihasilkan oleh tegangan S_2

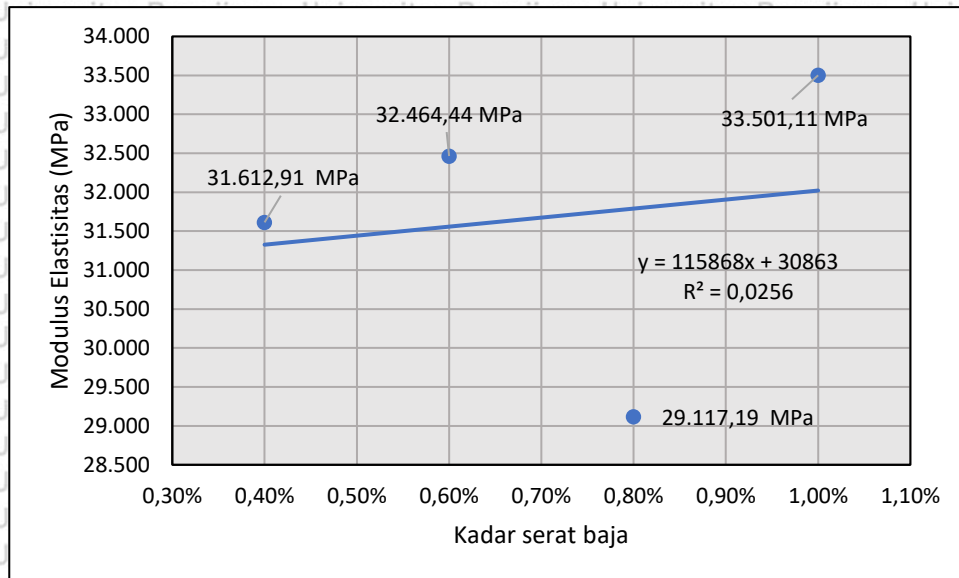
$$\epsilon_1 = 0.000050$$

Beban ultimit yang dipakai dalam penentuan nilai modulus elastisitas ini diambil berdasarkan kuat tekan beton tekan rata-rata. Hasil perhitungan modulus elastisitas untuk keempat pelat HPFRC dapat dilihat pada Tabel 5.35. Nilai modulus elastisitas pelat HPFRC berkisar antara 29.117,19 MPa hingga 33.501,11 MPa. Rata-rata modulus elastisitas adalah sebesar 31.673,91 MPa.

Tabel 5. 35 Modulus Elastisitas Beton Kinerja Tinggi

Uraian	Kadar serat	Tegangan			Regangan			Modulus Elastisitas (E)
		ultimit	S_2	S_1	ultimit	ϵ_2	ϵ_1	
		(MPa)	(MPa)	(MPa)	-	-	-	
HPFRC-2	0,4%	54,35	19,24	1,52	0,0015	0,00061	0,00005	31.612,91
HPFRC-3	0,6%	55,49	22,64	0,88	0,0018	0,00072	0,00005	32.464,44
HPFRC-4	0,8%	60,86	24,90	0,96	0,0021	0,00087	0,00005	29.117,19
HPFRC-5	1,0%	67,67	27,16	0,96	0,0018	0,00083	0,00005	33.501,11
Rata-rata								31.673,91

Hasil perhitungan modulus elastisitas yang diplotkan pada diagram hubungan modulus elastisitas dengan kadar serat pada Gambar 5.37 menunjukkan terjadinya peningkatan nilai modulus elastisitas dengan persamaan $y = 115.868x + 30.863$. Namun persamaan ini tidak dapat dianggap cukup baik karena hanya memiliki nilai $R^2 = 0,0256$. Hal ini disebabkan pada pelat HPFRC-3 memiliki nilai modulus elastisitas yang kecil, yaitu hanya 29.117,19 MPa.



Gambar 5. 37 Hubungan modulus elastisitas pelat HPFRC dan kadar serat baja.

5.5.6 Pengujian kuat tarik cabut

Pengujian kuat tarik cabut pada pemeriksaan kali ini dilakukan pada benda uji silinder $\phi 15 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ yang menggunakan tulangan polos dengan diameter 8 mm. Oleh karena itu, pada uji tarik cabut (*pullout test*) ini nilai-nilai yang diperhitungkan adalah:

$$d_3 = 120 \text{ mm}, d_2 = 8 \text{ mm}, h = 8 \text{ mm},$$

$$S = \sqrt{8^2 + ((120 - 8)/2)^2} = 56,6 \text{ mm},$$

$$A = \pi \cdot 56,6 \cdot \frac{(120 - 8)}{2} = 9.956 \text{ mm}^2,$$

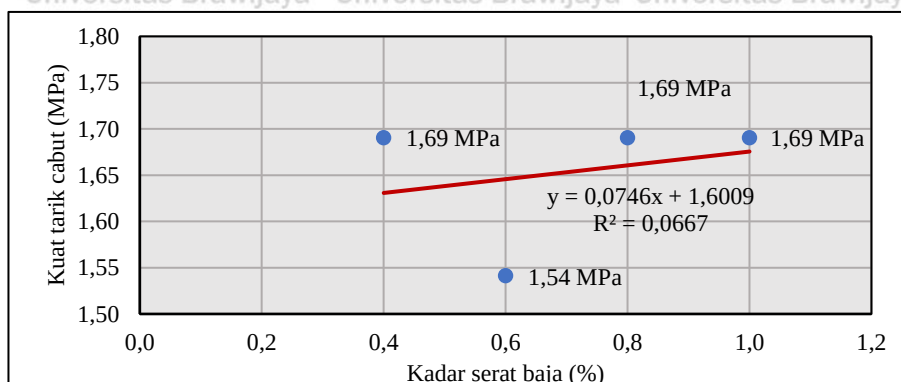
$$\sin \alpha = \frac{(d_3 - d_2)}{2S} = \frac{(120 - 8)}{2 \cdot 56,6} = 0,98,$$

$$f_n = (P/A) \sin \alpha = (0,99 P / 9.956)$$

Hasil perhitungan berdasarkan beban yang dibutuhkan untuk menarik cabut (*Pullout*) tulangan baja dari silinder beton tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.36. Hubungan antara kadar serat dan kuat tarik cabut (*pullout strength*) dapat dilihat pada Gambar 5.38.

Tabel 5. 36 Kuat Tarik Cabut Beton HPFRC dengan Tulangan $\phi 8$

Benda Uji	Kadar serat	Berat	Kuat Tarik Cabut
	%	kg	MPa
HPFRC 1	0,40	13,50	1,69
HPFRC 2	0,60	13,45	1,54
HPFRC 3	0,80	13,35	1,69
HPFRC 4	1,00	13,35	1,69
Rata-rata		13,38	1,58

Gambar 5.38 Hubungan kuat tarik cabut tulangan $\phi 8$ (Pullout) dan kadar serat baja

Serupa dengan hasil uji kuat tarik belah, maka pada uji kuat tarik cabut HPFRC dengan tulangan $\phi 8$ ini juga diperoleh hasil yang cenderung sama, yaitu sebesar 1,69 MPa. Sehingga dapat diasumsikan bahwa penambahan kadar serat baja tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kuat tarik cabut beton serat kinerja tinggi.

5.5.7 Berat volume benda uji

Berat volume rata-rata benda uji beton serat kinerja tinggi dihitung menggunakan benda uji silinder yang digunakan pada uji tekan. Hasil perhitungan berat volume beton serat kinerja tinggi untuk masing-masing komposisi serat baja dapat dilihat pada Tabel 5.37.

Tabel 5. 37 Rata-rata Berat Volume Benda Uji Silinder

Benda Uji	Kadar Serat	Berat Volume
	%	Kg/m ³
HPFRC 1	0,40	2.543,39
HPFRC 2	0,60	2.551,51
HPFRC 3	0,80	2.557,68
HPFRC 4	1,00	2.584,80
Rata-rata		2.547,81

5.5.8 Sifat mekanik bahan beton serat kinerja tinggi

Berdasarkan hasil uji bahan beton serat kinerja tinggi, diketahui bahwa pelat beton serat kinerja tinggi (HPFRC) yang diuji ini memiliki sifat mekanik berdasarkan rata-rata hasil pengujian sebagai berikut:

Tabel 5. 38 Sifat Mekanik Beton Serat Kinerja Tinggi

Uraian	Hasil pengujian		
	Spesimen FRC	Pelat HPFRC	Nilai akhir
Kuat tekan rata-rata silinder $\phi 15$ cm x 30 cm (MPa)	63,62	61,69	62,66
Kuat Tarik belah silinder $\phi 15$ cm x 30 cm (MPa)	4,42	3,48	3,95
Kuat lentur balok 15cm x 15cm x 60 cm (MPa)	7,20	-	7,20
Kuat lentur pelat 5cmx15cmx60cm <i>center point loading</i> (MPa)	7,84	-	7,84
Kuat lentur pelat 5cm x 15cm x60 cm <i>three point loading</i> (MPa)	7,47	-	7,47
Kuat Tarik Cabut silinder $\phi 15$ cm x 30 cm dengan tulangan D-10 (MPa)	4,34	-	4,34
Kuat Tarik Cabut silinder $\phi 15$ cm x 30 cm dengan tulangan $\phi 8$	-	1,58	1,58
Berat volume beton rata-rata (kg/m^3)	2.589,52	2.547,81	2.568,67
Modulus Elastisitas Beton (E_c), MPa	-	-	31.673,91
Modulus elastisitas baja D-10 (E_s), MPa	-	-	199.182,32
Kuat leleh baja D-10 (f_y), MPa	-	-	459,37
Modulus Elastisitas baja $\phi 8$ (E_s), MPa	-	-	224.171,26
Kuat leleh baja $\phi 8$ (f_y), MPa	-	-	450,63

Dari Tabel 5.38 terlihat bahwa kuat tarik belah beton serat kinerja tinggi (HPFRC) ini adalah sebesar 3,95 MPa atau 6,30% dari kuat tekannya yang bernilai 62,66 MPa. Sedangkan kuat lenturnya adalah 7,20 MPa atau sebesar 11,49% dari kuat tekannya. Kuat Tarik cabut yang diperoleh dari hasil uji adalah 4,34 MPa atau 6,93% dari nilai kuat tekan beton serat kinerja tinggi.

5.6 Pengujian Lentur Pelat HPFRC Satu Arah

Peralatan yang dipergunakan untuk melaksanakan uji lentur pelat adalah berupa Frame uji dengan kapasitas menahan beban hingga 13 ton, dongkrak untuk memberi beban dengan kapasitas 20 ton, baja profil IPE 100 sebagai pendistribusi beban sepanjang lebar pelat, dan tumpuan baja bulat. Sebagai alat pembaca data dipergunakan *Load Cell* dengan kapasitas 20 ton beserta pembaca data digital CAS CL-200A untuk membaca data beban seperti terlihat pada Gambar 5.39 dan *Data Logger* TDS-630 yang berfungsi membaca data dari 4 buah LVDT dan 3 buah *strain gauge* seperti terlihat pada Gambar 5.40.



(a)



(b)

Gambar 5.39 (a) Load cell 20 ton dan (b) pembaca data CAS CL-200A

LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*) digunakan untuk membaca data lendutan sebanyak 3 unit yang dipasang pada jarak $\frac{1}{4}$ bentang (1 unit) dan $\frac{1}{2}$ bentang (2 unit) dan membaca data deformasi horisontal atau lebar retak (1 unit) yang diletakkan pada sisi pelat dengan jarak 2 cm dari bawah pelat atau sejajar dengan posisi baja tulangan.



(a)



(b)

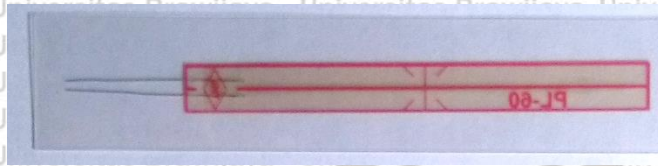
Gambar 5.40 (a) LVDT, (b) Data Logger TDS-630

Untuk mencatat data regangan yang terjadi pada pelat beton serat kinerja tinggi, dipasang *strain gauge* baja sebanyak 2 buah yang diletakkan pada sisi bawah baja tulangan tengah dan baja tulangan tepi D-10, serta 1 buah *strain gauge* beton yang diletakkan pada sisi atas pelat tepat di tengah bentang. Adapun data teknis dari *strain gauge* yang dipergunakan dapat dilihat pada Tabel 5.39 dengan tampilan *strain gauge* seperti pada Gambar 5.41.

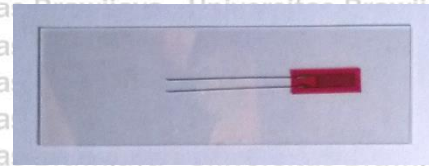
Setting pengujian lentur disusun seperti pada Gambar 5.42. Pemberian beban dilaksanakan secara bertahap dengan pembacaan beban setiap kenaikan 50 kg hingga terjadi retakan awal. Sesudah itu pembacaan beban dilaksanakan setiap kenaikan 100 kg dan retakan yang terjadi di dokumentasikan menggunakan alat *Dyno-lite* dengan *software Dyno-capture 2.0*.

Tabel 5. 39 Data Teknik *Strain Gauge* Beton dan Baja

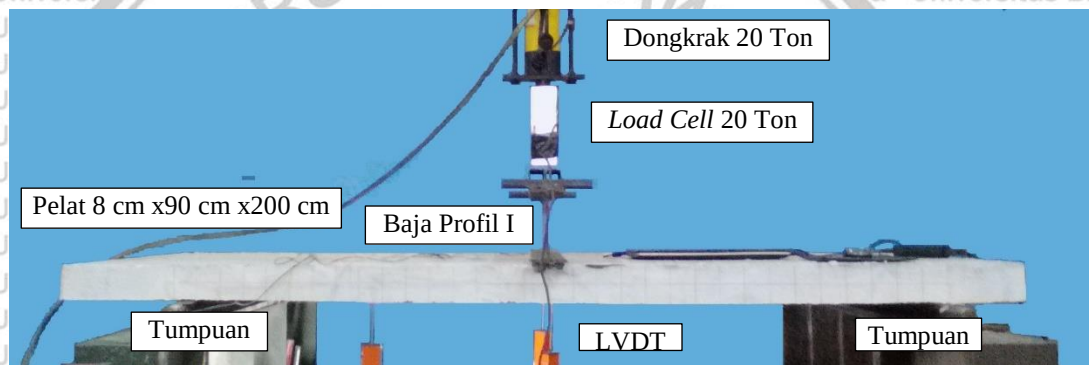
No.	Uraian	<i>Strain Gauge</i> Baja	<i>Strain Gauge</i> Beton
1	Pabrik	Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.	
2	Type	FLA-6-11	PL-60-11
3	Gauge length	6 mm	60 mm
4	Gauge factor	$2.12 \pm 1\%$	$2.13 \pm 1\%$
5	Gauge Resistance	$120 \pm 0.3 \Omega$	$120 \pm 0.3 \Omega$
6	Temp. compensation for	$11 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	$11 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
7	Transverse Sensitivity	0,1%	0,8%



(a)



(b)

Gambar 5.41 (a) *Strain gauge* beton dan (b) *strain gauge* baja

Gambar 5.42 Setting pengujian lentur pelat HPFRC

Dari hasil pengujian lentur 4 buah pelat HPFRC tersebut di dapat nilai-nilai sebagai berikut:

Tabel 5. 40 Hasil Pengujian Pada Tahap Pembebanan Berbeda

Label	Kadar serat	Kuat Tekan (Mpa)	Saat retak awal			Saat baja leleh			Saat pelat runtuh		
			P_e	Δ_e	w_e	P_y	Δ_y	w_y	P_u	Δ_u	w_u
			(kN)	(mm)	(mm)	(kN)	(mm)	(mm)	(kN)	(mm)	(mm)
HPFRC-1	0,4 %	54,35	14,350	2,53	0,041	-	-	-	29,381	19,74	0,108
HPFRC-2	0,6 %	55,49	11,903	2,03	0,076	-	-	-	30,562	20,19	0,162
HPFRC-3	0,8 %	60,68	18,769	3,02	0,090	32,887	14,03	0,158	33,794	16,60	0,236
HPFRC-4	1,0 %	67,67	19,759	3,90	0,071	33,126	17,23	0,184	33,400	18,46	0,206

5.7 Perilaku Lentur Pelat HPFRC Satu Arah

5.7.1 Analisis gaya dalam pelat beton serat kinerja tinggi

Beton dapat retak pada tahap awal pembebanannya karena bahan ini lemah terhadap tarik. Retak memiliki kontribusi terhadap korosi tulangan, rusaknya permukaan beton dan efek jangka panjang lainnya. Prakiraan retak dan lebar retak merupakan hal paling utama dalam *serviceability* untuk keadaan pembebanan jangka panjang (Nawy, 1990, Soehardjono, 2004). Dalam proses analisis mengenai masalah retak pelat, digunakan asumsi berikut:

1. Baja dan beton diasumsikan sebagai bahan elastis linier dan homogen.
2. Pelat satu arah digambarkan sebagai sistem dua dimensi dan tegangan dianalisis dalam kondisi *plane stress*.
3. Variasi tegangan beton akibat susut, perubahan suhu, dan ketinggian sumbu netral antara dua retak yang berurutan diabaikan.
4. Analisis hanya dilakukan pada retak primer.
5. Penampang datar akan tetap datar dalam lentur untuk semua penampang sebelum terjadinya retak pertama, dan hanya pada penampang retak sesudahnya

Dalam pembahasan mengenai analisis gaya dalam pelat HPFRC ini, digunakan data hasil pengujian pada 4 buah pelat sebagaimana terlihat pada Tabel 5.41.

Tabel 5. 41 Detail Data Pelat HPFRC

Uraian	Notasi	Satuan	Pelat HPFRC			
			1	2	3	4
Kadar serat		%	0,40	0,60	0,80	1,00
Tebal pelat	h	mm	80	80	80	80
Lebar pelat	b	mm	900	900	900	900
Selimut beton	c	mm	20	20	20	20
Tebal efektif pelat	d	mm	60	60	60	60
Dia. Tul. Memanjang	D	mm	10	10	10	10
Dia. Tul. Melintang	ϕ	mm	8	8	8	8
Luas pelat	A_g	mm ²	72.000	72.000	72.000	72.000
Berat volume/m ³		Kg/m ²	2.543,39	2.551,51	2.557,68	2.584,80
Luas tulangan tarik	A_s	mm ²	78,54	78,54	78,54	78,54
Rasio tulangan	ρ		0,0076	0,0076	0,0076	0,0076
Panjang <i>slip</i> retak awal	a_{maks}	mm	390,00	390,00	387,50	385,00
Kuat tekan beton	f'_c	MPa	54,35	55,49	60,86	67,67
Kuat tarik belah beton	f_{ct}	MPa	3,87	3,45	4,09	3,01
Kuat Tarik baja	f_y	MPa	459,37	459,37	459,37	459,37
Kuat Tarik cabut		MPa	4,34	4,34	4,34	4,34
Kuat lentur balok	f_r	MPa	7,20	7,20	7,20	7,20
Spasi tulangan	s	mm	142,00	142,00	142,00	142,00
Modulus elastisitas beton (tanpa serat baja)	E_c	MPa	31.612,91	32.464,44	29.117,19	33.501,11
Modulus elastisitas baja	E_s	MPa	199.182,32	199.182,31	199.182,32	199.182,32

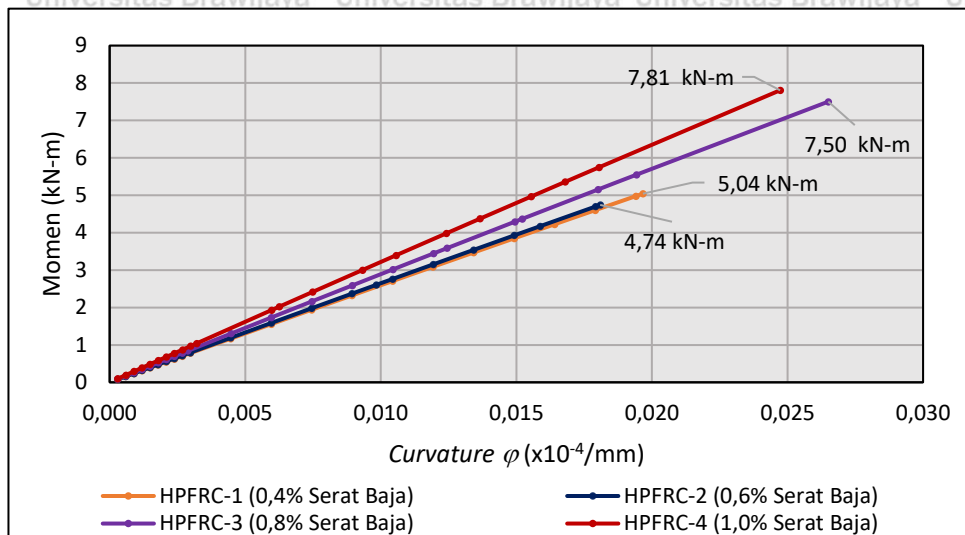
1. Gaya dalam pada penampang sebelum terjadi retak.

Pada saat benda uji pelat beton serat kinerja tinggi diberi beban terpusat yang didistribusikan secara merata dengan balok IPE-100 sepanjang lebar pelat, maka terjadi pula peningkatan besaran momen pada pelat HPFRC satu arah tersebut. Gaya aksial dan momen pada Tabel 5.42 adalah besaran gaya yang terjadi sesaat sebelum pelat HPFRC mengalami retak yang pertama, sesuai dengan pembacaan beban saat terjadinya retakan pertama sebelum pembacaan beban dari *load cell* secara tiba-tiba turun.

Tabel 5. 42 Gaya Dalam pada Kondisi Pra-Retak

Pelat	ε_{c1} x10 ⁻⁴	kd mm	y_t mm	$\Phi(\varepsilon(y))$ MPa	f_{st} Mpa	F_{st} kN	F_c kN	F_t kN	M kN-m	ϕ -/mm
HPFRC-1	0,66	33,484	45,75	3,5205	10,39	5,41	106,09	100,69	5,042	1,97E-06
HPFRC-2	0,61	33,486	45,81	3,3106	9,55	4,97	99,77	94,80	4,742	1,81E-06
HPFRC-3	0,88	33,381	45,59	5,2500	14,05	7,31	157,72	150,41	7,502	2,65E-06
HPFRC-4	0,82	33,348	45,69	5,4651	13,13	6,83	164,03	157,19	7,806	2,47E-06

Distribusi *Moment-Curvature* yang terjadi pada penampang pelat HPFRC pra-retak ditampilkan melalui diagram pada Gambar 5.43.



Gambar 5. 43 Moment-Curvature pelat HPFRC pra-retak

2. Gaya dalam dan momen saat retak pertama

Untuk pelat HPFRC-1 (0,4% serat baja), diketahui nilai f_c' adalah 54,35 MPa, sehingga dengan persamaan (4-10) didapat:

$$f_r = 0,94 \sqrt{54,35} = 6,93 \text{ MPa}$$

Sehingga dari persamaan (4-9) bisa didapat beberapa nilai yang perlu diperiksa, yaitu:

$$\varepsilon_{c2} = \frac{f_r}{E_{ct}} = \frac{6,93 \text{ MPa}}{54.350,00 \text{ MPa}} = 0,0001275$$

Sedangkan jarak garis netral ke sisi tekan terluar dihitung dengan persamaan (4-11), untuk nilai $\varepsilon_{c1} = 0,000066$ adalah:

$$kd = \left[\frac{\varepsilon_{c1}}{\varepsilon_{c1} + \varepsilon_{c2}} \right] h = \left[\frac{0,000066}{0,000066 + 0,0001275} \right] 80 = 27,248 \text{ mm}$$

Untuk pelat HPFRC dengan nilai f_c' yang berbeda, nilai f_r , nilai ε_{c2} dan nilai kd pada saat retak dapat dihitung menggunakan persamaan (4-9) hingga (4-11) sebagaimana terlihat pada Tabel 5.43.

Tabel 5. 43 Jarak dari Garis Netral ke Sisi Tekan Terluar kd pada Saat Retak

Pelat	f_c' (MPa)	f_r (MPa)	ε_{c2} $\times 10^{-4}$	kd (mm)
HPFRC-1	54,35	6,93	1,275	27,248
HPFRC-2	55,49	7,00	1,262	25,948
HPFRC-3	60,68	7,32	1,207	33,843
HPFRC-4	67,67	7,73	1,143	33,533

Momen dan gaya dalam yang dihitung berdasarkan nilai kd menurut persamaan (4-12) dapat dilihat pada tabel 5.44.

Tabel 5. 44 Momen Retak Berdasarkan Perkiraan Nilai kd

Pelat	ε_{c1} $\times 10^{-4}$	kd mm	y_t mm	$\Phi(\varepsilon(y))$ mm	f_{st} Mpa	F_{st} Mpa	F_c kN	F_t kN	M_{cr} kN-m
HPFRC-1	0,66	27,248	52,75	3,5205	15,7681	8,21	86,33	164,51	7,230
HPFRC-2	0,61	25,948	54,05	3,3106	15,8343	8,24	77,32	170,32	7,421
HPFRC-3	0,88	33,843	46,16	5,2500	13,6210	7,09	159,90	152,09	7,571
HPFRC-4	0,82	33,533	46,47	5,4651	12,9641	6,75	164,93	161,69	7,953

Sementara itu, Edward G. Nawy (1990) menyatakan bahwa daerah praretak berhenti pada saat mulainya retak lentur pertama di mana tegangan beton mencapai kekuatan modulus rupture-nya f_r . Modulus rupture sebanding dengan akar kekuatan tekannya. Persamaan untuk nilai f_r yang dipergunakan untuk beton HPFRC berdasarkan (ACI 363R-10, 2010).

$$f_r = 11,7 \sqrt{f'_c} \text{ (psi) atau } f_r = 0,94 \sqrt{f'_c} \text{ (MPa)} \quad (5-13)$$

Jika jarak serat tarik terluar ke pusat berat penampang adalah y_t dan momen retaknya M_{cr} , maka:

$$M_{cr} = \frac{I_g f_r}{y_t} \quad (5-14)$$

dan untuk penampang segiempat atau pada pelat, nilai y_t diambil:

$$y_t = \frac{h}{2} \quad (5-15)$$

Dengan demikian jika persamaan (5-14) digunakan untuk menghitung momen retak pelat HPFRC yang ada, akan diperoleh hasil sebagaimana terlihat pada Tabel 5.45.

Tabel 5. 45 Perhitungan Momen Retak (Nawy, 1990)

Pelat	b Mm	h mm	I_g mm ⁴	y_t mm	f'_c Mpa	f_r Mpa	M_{cr} kN-m
HPFRC-1	900	80	38.400.000	40	54,35	6,93	6,65
HPFRC-2	900	80	38.400.000	40	55,49	7,00	6,72
HPFRC-3	900	80	38.400.000	40	60,68	7,32	7,03
HPFRC-4	900	80	38.400.000	40	67,67	7,73	7,42

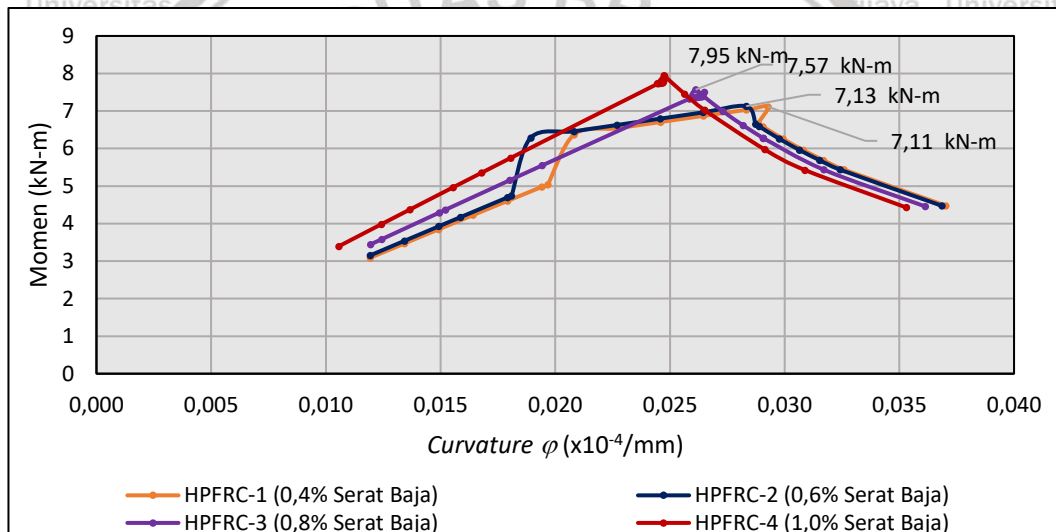
Untuk menentukan nilai tegangan tarik yang terjadi pada serat ekstrim tarik pelat HPFRC digunakan persamaan $f_{ct} = \frac{h-kd}{kd} \Phi(\varepsilon_c)$. Regangan tarik beton sebelum retak dihitung dengan persamaan $\varepsilon_{cr} = \frac{f_{ct}}{E_{ct}}$ dan jarak dari sumbu netral ke pusat blok tegangan tarik beton menggunakan persamaan $k_t d = \frac{2}{3}(h-kd)$. Regangan tarik beton setelah retak menggunakan persamaan $\varepsilon_{cr} = \frac{f_r}{E_{ct}}$. Jarak dari sumbu netral menuju permukaan tegangan

tarik y_t dihitung dengan persamaan $y_t = \frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_c} kd$. Penjumlahan dari nilai kd dan y_t merupakan tebal pelat residu (h_r) yang tidak retak atau $h_r = kd + y_t$.

Tabel 5. 46 Gaya Dalam pada Kondisi saat Retak Pertama

Pelat	ε_{c1} $\times 10^{-4}$	kd mm	y_t mm	$\Phi(\varepsilon(y))$ MPa	f_{st} Mpa	F_{st} kN	F_c kN	F_t kN	M kN-m	ϕ -/mm
HPFRC-1	0,94	32,557	44,20	4,98	15,77	8,21	146,05	137,84	6,664	2,88E-06
HPFRC-2	0,93	32,338	43,91	5,04	15,83	8,24	146,60	138,36	6,648	2,87E-06
HPFRC-3	0,88	33,808	46,22	5,24	13,62	7,09	159,38	152,29	7,572	2,61E-06
HPFRC-4	0,83	33,692	46,19	5,52	12,96	6,75	167,47	160,72	7,948	2,47E-06

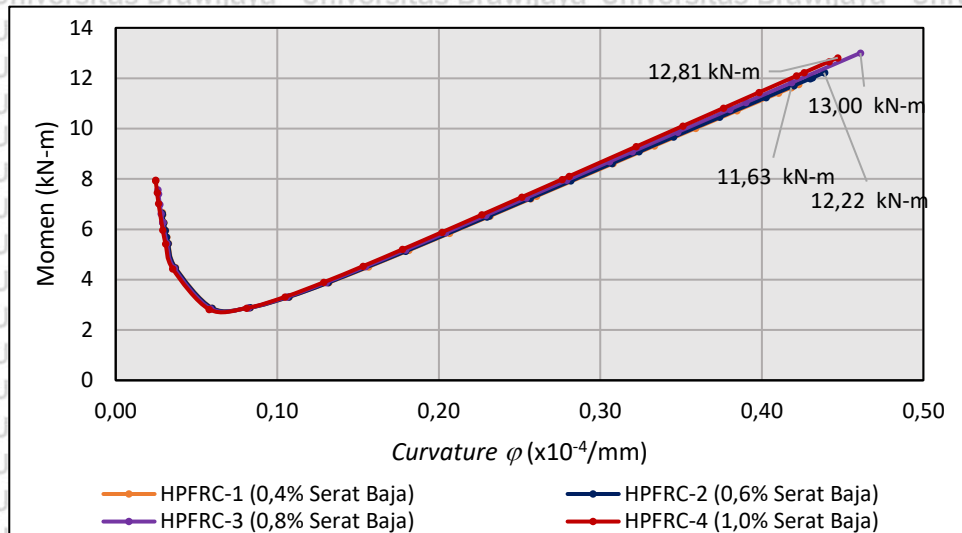
Gaya dalam pada Tabel 5.46 adalah gaya dalam yang diperoleh pada saat pelat mengalami retak pertama dan tegangan tarik beton mencapai nilai *modulus rupture* f_r . Hubungan *Moment-Curvature* pelat HPFRC yang terjadi pada saat retak dapat dilihat pada Gambar 5.44.



Gambar 5. 44 *Moment-Curvature* pelat HPFRC saat retak pertama

3. Gaya dalam pada penampang setelah retak pertama

Nilai tegangan baja f_{st} terus dimodifikasi hingga mencapai titik leleh f_y dengan diagram momen dan *curvature* yang di dapatkan sebagaimana terlihat pada Gambar 5.45 dan nilai-nilai gaya dalam pada saat tulangan baja mencapai kuat tarik lelehnya terlihat pada Tabel 5.47. Tegangan tarik beton serat kinerja tinggi yang digunakan adalah $f_{ct} = f_r$ pada saat setelah terjadi retak pertama.



Gambar 5. 45 Moment-Curvature pelat HPFRC paska-retak pertama ($f_s \leq f_y$)

Pada tahap ini mula-mula terjadi penurunan nilai momen. Hal ini disebabkan terjadinya perubahan letak garis netral k_d secara drastis akibat berkembangnya kedalaman retak (a) pada saat retak pertama terjadi. Penambahan nilai momen $M = A_{st} F_{st} (d - k_d)$ akibat pengaruh penambahan nilai tegangan baja tidak dapat mengatasi turunnya kemampuan menahan beban luar atau turunnya nilai momen akibat gaya aksial beton tekan $M = F_c \cdot k_c d$ dan akibat gaya aksial beton tarik $M = F_t \cdot k_t d$.

Seiring dengan terus meningkatkan beban P , maka nilai momen total akan kembali meningkat sesuai dengan meningkatnya momen akibat gaya tekan beton serat kinerja tinggi dan juga momen akibat gaya tarik baja. Hal ini menyebabkan timbulnya retakan-retakan baru hingga tulangan baja mencapai tegangan lelehnya ($f_s = f_y$).

Tabel 5. 47 Gaya Dalam setelah Retak Hingga Baja Tulangan Leleh

Pelat	ε_{c1} $\times 10^{-4}$	k_d mm	y_t mm	$\Phi(\varepsilon(y))$ MPa	f_{st} Mpa	F_{st} kN	F_c kN	F_t kN	M kN-m	ϕ -/mm
HPFRC-1	5,24	11,111	2,70	24,75	459,37	239,10	247,53	8,43	13,080	4,72E-05
HPFRC-2	5,18	10,999	2,68	25,01	459,37	239,10	247,55	8,45	13,093	4,71E-05
HPFRC-3	4,91	10,529	2,59	26,13	459,37	239,10	247,63	8,53	13,147	4,66E-05
HPFRC-4	4,60	9,984	2,48	27,57	459,37	239,10	247,72	8,62	13,210	4,61E-05

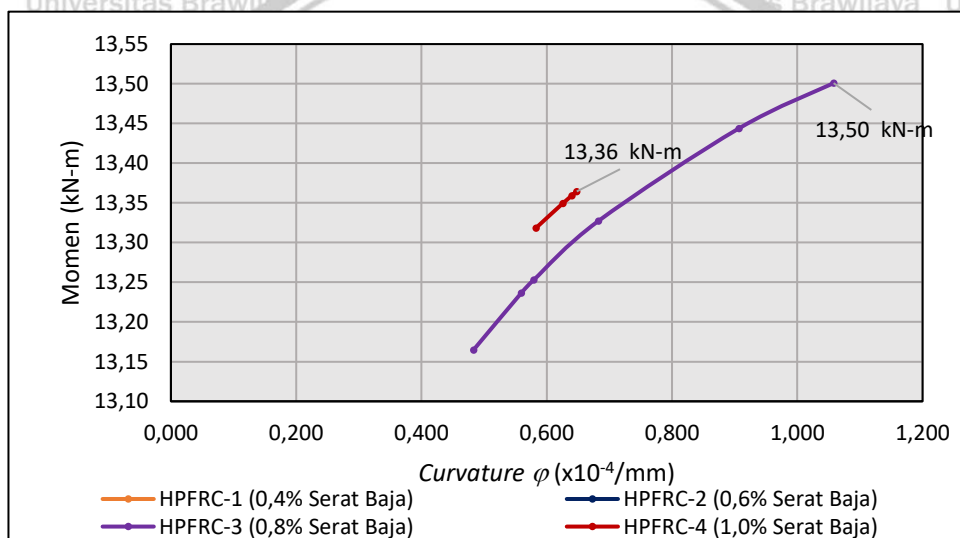
Parameter yang didapatkan dalam analisis gaya dalam pada kondisi beban layan hingga tercapainya tegangan baja leleh (f_y) dapat dilihat pada Tabel 5.47. Gaya dalam pada Tabel 5.47 adalah pada saat regangan baja mencapai nilai $\varepsilon_s = 0,002$ (kondisi regangan baja saat leleh).

4. Gaya pada penampang paska leleh baja tulangan

Pada Gambar 5.46 diperlihatkan hubungan *Moment-Curvature* pada tahap paska leleh baja tulangan. Terlihat bahwa hubungan *Moment-Curvature* merupakan hubungan non linier. Gaya dalam pada saat pelat HPFRC mencapai nilai kuat tekan f_c' atau pada saat regangan beton mencapai nilai $\varepsilon_c = 0,002$ terlihat pada Tabel 5.48.

Tabel 5. 48. Gaya Dalam pada Penampang Paska Leleh Baja Tulangan

Pelat	ε_{cl} $\times 10^{-4}$	kd mm	y_t mm	$\Phi(\varepsilon(y))$ MPa	f_{st} Mpa	F_{st} kN	F_c kN	F_t kN	M kN-m	ϕ -/mm
HPFRC-3	20	4,394	0,27	60,68	459,37	239,1	239,97	0,87	13,823	4,55E-04
HPFRC-4	20	3,939	0,23	67,67	459,37	239,1	239,88	0,78	13,877	5,08E-04

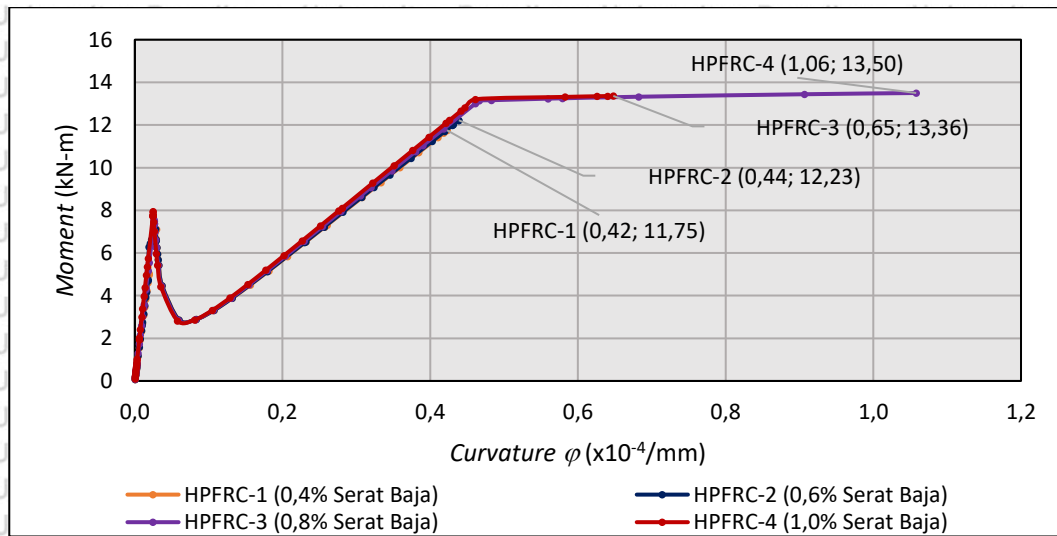


Gambar 5. 46 Momen – curvature pelat HPFRC paska beban layan ($f_{st} > f_y$)

5. Diagram moment-curvature penampang pelat HPFRC

Diagram *Moment-Curvature* berdasar hasil analisis gaya dalam dengan nilai *moment* yang telah dirinci sejak awal (pra-retak) hingga pelat HPFRC runtuh (*failure*) terlihat pada Gambar 5.47. Diagram pada Gambar 5.47 disusun berdasarkan kenaikan (*increment*) regangan beton dan tegangan tarik baja sesuai dengan perkembangan momen pada pelat yang timbul akibat beban luar sejak awal, pada saat retak pertama hingga pelat mengalami keruntuhan. Terlihat bahwa pada saat runtuh, pelat HPFRC-1 memiliki nilai *moment* 11,75 kN-m dengan nilai *curvature* $0,42 \times 10^{-4}/\text{mm}$. Pelat HPFRC-2 runtuh pada *moment* 12,23 kN-m dengan *curvature* $0,44 \times 10^{-4}/\text{mm}$. Pelat HPFRC-3 runtuh pada besaran *moment* 13,36 kN-m dengan *curvature* $0,65 \times 10^{-4}/\text{mm}$. Pelat HPFRC-4 runtuh pada besaran *moment* 13,50 kN-

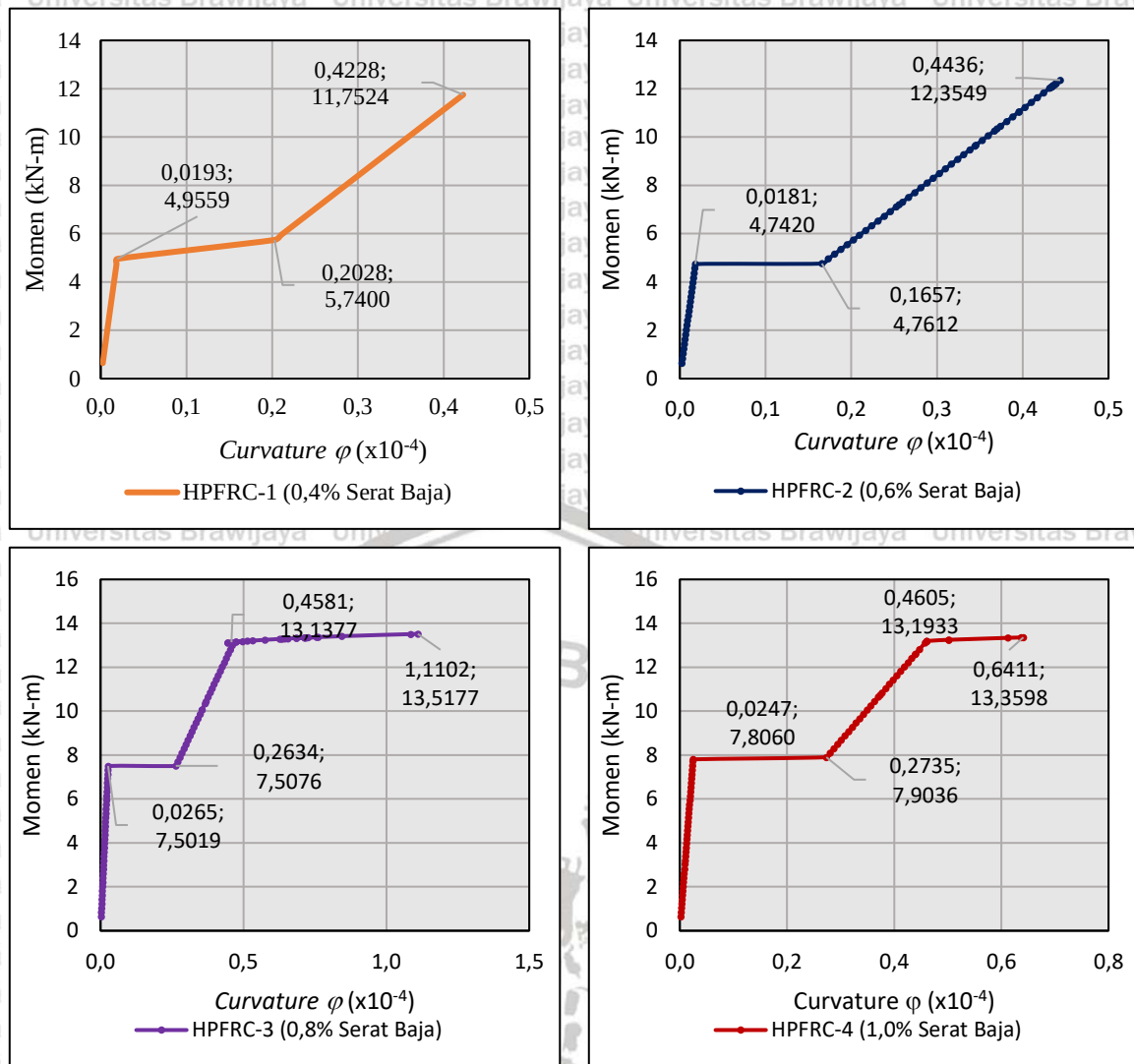
m dengan *curvature* $1,06 \times 10^{-4}/\text{mm}$. Rincian perhitungan dapat dilihat pada Tabel L6.4 hingga Tabel L6.7 pada Lampiran 6.



Gambar 5. 47 *Moment-curvature* pelat HPFRC pada kondisi elastis hingga mengalami kegagalan (failure) berdasarkan variasi kadar serat baja dari hasil analisis gaya dalam dengan momen.

Walaupun pada saat terjadi retak pertama, kemampuan pelat menahan beban memang mengalami penurunan, namun pencatatan beban maupun lendutan serta regangan yang terjadi dilaksanakan berdasarkan pembacaan beban yang terus meningkat. Oleh karena itu, diagram *moment-curvature* pelat HPFRC yang diuji disesuaikan dengan hasil pembacaan beban yang telah diubah sebagai momen pada pelat. Diagram *moment-curvature* yang telah disesuaikan untuk masing-masing pelat HPFRC dapat dilihat pada Gambar 5.48.

Luas bidang *Moment-curvature* sebagai hasil pengujian lentur pelat HPFRC-1 adalah $[4,9559 \times (0,0193 \cdot 10^{-4})/2] + \{[(4,9559 + 5,7400)/2] \times \{(0,2028 - 0,0193) \cdot 10^{-4}\}\} + \{[(5,7400 + 11,7524)/2] \times \{(0,4228 - 0,2028) \cdot 10^{-4}\}\} = 295,33$ Newton. Luas bidang *Moment-curvature* pelat HPFRC-2 adalah $[4,7420 \times (0,0181 \cdot 10^{-4})/2] + \{[(4,7612 + 4,7420)/2] \times \{(0,1657 - 0,0181) \cdot 10^{-4}\}\} + \{[(4,7612 + 12,3549)/2] \times \{(0,4436 - 0,1657) \cdot 10^{-4}\}\} = 312,25$ Newton. Luas bidang *Moment-curvature* pelat HPFRC-3 adalah $[7,5019 \times (0,0265 \cdot 10^{-4})/2] + \{[(7,5019 + 7,5076)/2] \times \{(0,2634 - 0,0265) \cdot 10^{-4}\}\} + \{[(13,1377 + 7,5076)/2] \times \{(0,4581 - 0,2634) \cdot 10^{-4}\}\} + \{[(13,1377 + 13,5177)/2] \times \{(1,1102 - 0,4581) \cdot 10^{-4}\}\} = 1257,81$ Newton. Luas bidang *Moment-curvature* pelat HPFRC-4 adalah $[7,8060 \times (0,0247 \cdot 10^{-4})/2] + \{[(7,8060 + 7,9036)/2] \times \{(0,2735 - 0,0247) \cdot 10^{-4}\}\} + \{[(7,9036 + 13,1933)/2] \times \{(0,4605 - 0,2735) \cdot 10^{-4}\}\} + \{[(13,1933 + 13,3598)/2] \times \{(0,6411 - 0,4605) \cdot 10^{-4}\}\} = 642,10$ Newton.



Gambar 5. 48 Moment-curvature pelat HPFRC pada kondisi elastis hingga mengalami kegagalan (*failure*) berdasarkan variasi kadar serat baja.

Luasan Moment-curvature dapat dirangkum pada Tabel 5.49. Luasan ini sering juga disebut sebagai energi potensial pelat.

Tabel 5. 49 Tegangan dan Momen Pelat HPFRC saat Mengalami Kegagalan Lentur

Pelat	Moment kN-m	Curvature ϕ $10^{-4}/\text{mm}$	Luasan $M-\phi$ N
HPFRC-1 (0,4%)	11,75	0,42	295,33
HPFRC-2 (0,6%)	12,35	0,44	312,25
HPFRC-3 (0,8%)	13,52	1,11	1257,81
HPFRC-4 (1,0%)	13,36	0,64	642,10

Adapun dari hasil analisis gaya dalam, dapat diperoleh nilai kuat tekan pada sisi tekan pelat f_c dan kuat tarik baja f_s masing-masing pelat adalah seperti terlihat pada Tabel 5.50.

Tabel 5. 50 Tegangan Beton dan Baja Pelat HPFRC Saat Runtuh

Pelat	Kapasitas bahan penyusun		Saat pelat runtuh	
	f_c'	f_y	f_c	f_s
	MPa	MPa	MPa	MPa
HPFRC-1	54,35	459	21,88	400
HPFRC-2	55,49	459	23,08	420
HPFRC-3	60,68	459	35,04	459
HPFRC-4	67,67	459	32,10	459

Dari tabel 5.50 terlihat bahwa kegagalan lentur keempat pelat HPFRC terjadi saat tegangan tekan pelat HPFRC belum mencapai kapasitas kuat tekan betonnya. Tegangan tarik baja tulangan pelat HPFRC-1 dan HPFRC-2 pada saat mengalami kegagalan lentur juga belum mencapai nilai kapasitas kuat leleh baja, sedangkan untuk pelat HPFRC-3 dan HPFRC-4 tegangan tarik baja tulangnya telah mencapai kuat leleh baja. Hasil perhitungan gaya dalam pada saat terjadi retak pada pengujian lentur pelat HPFRC-1 dengan kadar serat baja 0,4% dapat dilihat pada Tabel 5.51.

Tabel 5. 51 Gaya Dalam Sesuai Perkembangan Retak Pelat HPFRC-1

Kondisi Pelat	ε_{c1} $\times 10^{-4}$	kd mm	y_t mm	$\Phi(\varepsilon(y))$ MPa	f_{st} Mpa	F_{st} kN	F_c kN	F_t kN	M kN-m	ϕ $10^{-4}/\text{mm}$
Retak 1	0,65	33,49	45,76	3,46	10,21	5,31	104,28	98,97	4,956	0,19
Retak 2	2,31	11,41	6,29	11,85	196,25	102,15	121,75	19,61	5,740	0,20
Retak 3	2,56	11,28	5,61	13,04	220,65	114,85	132,34	17,49	6,407	0,23
Retak 4	2,71	11,22	5,27	13,74	234,89	122,26	138,71	16,45	6,800	0,24
Retak 5	2,89	11,16	4,92	14,58	251,90	131,11	146,47	15,35	7,271	0,26
Retak 6	3,32	11,09	4,25	16,56	292,05	152,01	165,27	13,26	8,389	0,30
Retak 7	3,67	11,06	3,84	18,13	323,64	168,45	180,43	11,98	9,272	0,33
Retak 8	4,47	11,06	3,16	21,57	393,62	204,87	214,72	9,85	11,234	0,40
Runtuh	4,68	11,07	3,02	22,47	412,07	214,48	223,88	9,40	11,752	0,42

Tabel 5.52 menunjukkan nilai gaya dalam sesuai perkembangan retak yang terjadi pada pengujian lentur pelat HPFRC-2 dengan kadar serat baja 0,6%.

Tabel 5. 52 Gaya Dalam Sesuai Perkembangan Retak Pelat HPFRC-2

Kondisi Pelat	ε_{c1} $\times 10^{-4}$	kd mm	y_t mm	$\Phi(\varepsilon(y))$ MPa	f_{st} Mpa	F_{st} kN	F_c kN	F_t kN	M kN-m	ϕ $10^{-4}/\text{mm}$
Retak 1	0,61	33,49	45,81	3,31	9,55	4,97	99,77	94,80	4,742	0,02
Retak 2	2,72	11,10	5,14	14,08	239,02	124,41	140,61	16,20	6,920	0,25
Retak 3	2,83	11,06	4,94	14,59	249,22	129,72	145,27	15,55	7,203	0,26
Retak 4	3,09	11,01	4,49	15,84	274,31	142,78	156,92	14,15	7,901	0,28
Retak 5	3,77	10,95	3,67	18,93	336,12	174,95	186,51	11,56	9,631	0,34
Retak 6	4,05	10,94	3,41	20,19	361,44	188,12	198,87	10,75	10,341	0,37
Retak 7	4,33	10,95	3,19	21,43	386,40	201,12	211,17	10,05	11,042	0,39
Runtuh	4,81	10,97	2,88	23,50	428,49	223,02	232,09	9,06	12,225	0,44

Untuk pelat HPFRC-3 dengan kadar serat baja 0,8%, hasil analisis gaya dalam sesuai perkembangan retak dapat dilihat pada Tabel 5.53.

Tabel 5. 53 Gaya Dalam Sesuai Perkembangan Retak Pelat HPFRC-3

Kondisi	ε_{cl}	kd	y_t	$\Phi(\varepsilon(y))$	f_{st}	F_{st}	F_c	F_t	M	ϕ
Pelat	$\times 10^{-4}$	mm	mm	MPa	Mpa	kN	kN	kN	kN-m	$10^{-4}/\text{mm}$
Retak 1	0,88	33,38	45,59	5,25	14,05	7,31	157,72	150,41	7,502	0,03
Retak 2	3,14	10,53	4,04	17,58	294,33	153,20	166,51	13,31	8,492	0,30
Retak 3	3,29	10,51	3,86	18,31	308,31	160,47	173,19	12,71	8,885	0,31
Retak 4	3,58	10,49	3,54	19,76	336,11	174,94	186,61	11,67	9,667	0,34
Retak 5	3,83	10,49	3,30	21,03	360,47	187,62	198,50	10,88	10,355	0,37
Retak 6	4,02	10,49	3,15	21,93	377,86	196,67	207,05	10,38	10,845	0,38
Retak 7	4,32	10,50	2,93	23,37	405,67	211,15	220,81	9,66	11,630	0,41
Retak 8	4,78	10,52	2,66	25,52	447,34	232,84	241,60	8,76	12,807	0,45
Retak 9	5,16	10,05	2,35	27,29	459,37	239,10	246,84	7,74	13,195	0,51
Runtuh	7,83	7,05	1,09	38,22	459,37	239,10	242,68	3,58	13,518	1,11

Tabel 5.54 memperlihatkan gaya dalam hasil uji lentur pelat HPFRC-4 dengan kadar serat baja 1,0% pada setiap tahap perkembangan retak.

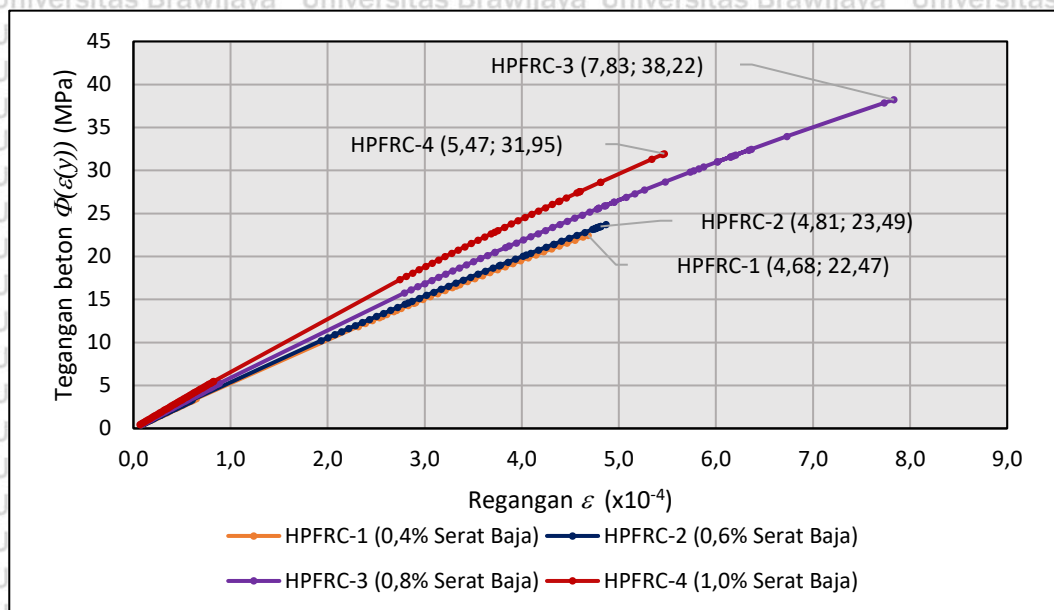
Tabel 5. 54 Gaya Dalam Sesuai Perkembangan Retak Pelat HPFRC-4

Kondisi	ε_{cl}	kd	y_t	$\Phi(\varepsilon(y))$	f_{st}	F_{st}	F_c	F_t	M	ϕ
Pelat	$\times 10^{-4}$	mm	mm	MPa	Mpa	kN	kN	kN	kN-m	$10^{-4}/\text{mm}$
Retak 1	0,82	33,35	45,69	5,47	13,13	6,83	164,03	157,19	7,806	0,02
Retak 2	3,08	9,98	3,71	19,22	306,95	159,76	172,67	12,91	8,885	0,31
Retak 3	3,14	9,98	3,63	19,60	313,85	163,36	175,98	12,62	9,080	0,32
Retak 4	3,48	9,96	3,27	21,50	348,40	181,34	192,71	11,38	10,059	0,35
Retak 5	3,72	9,95	3,06	22,82	372,41	193,83	204,48	10,64	10,740	0,37
Retak 6	3,89	9,96	2,92	23,78	389,81	202,89	213,06	10,17	11,234	0,39
Retak 7	4,17	9,96	2,73	25,29	417,48	217,29	226,79	9,49	12,020	0,42
Retak 8	4,38	9,97	2,60	26,39	437,59	227,76	236,82	9,05	12,591	0,44
Retak 9	4,60	9,98	2,48	27,54	458,80	238,80	247,43	8,63	13,193	0,46
Retak 10	4,81	9,58	2,28	28,64	459,37	239,10	247,02	7,92	13,250	0,50
Runtuh	5,47	8,53	1,78	31,95	459,37	239,10	245,30	6,20	13,360	0,64

5.7.2 Distribusi tegangan-regangan akibat lentur pada beton dan baja.

Dengan memasukkan data kuat tekan karakteristik (f'_c) dari tabel 5.41, untuk pelat HPFRC-1 sebesar $f'_c = 54,35$ MPa, pelat HPFRC-2 sebesar $f'_c = 55,49$ MPa, pelat HPFRC-3 sebesar $f'_c = 60,86$ MPa, dan pelat HPFRC-4 sebesar $f'_c = 67,67$ MPa, maka berdasarkan persamaan 4.1 dapat disusun idealisasi hubungan konstitutif tegangan-regangan beton.

Diagram hubungan tegangan regangan beton tersebut disusun berdasar hasil analisis gaya dalam pada saat pelat beton serat kinerja tinggi mengalami kegagalan lentur pada uji lentur di laboratorium, diagram hubungan tegangan-regangan beton dengan variasi kadar serat baja adalah seperti pada Gambar 5.49.



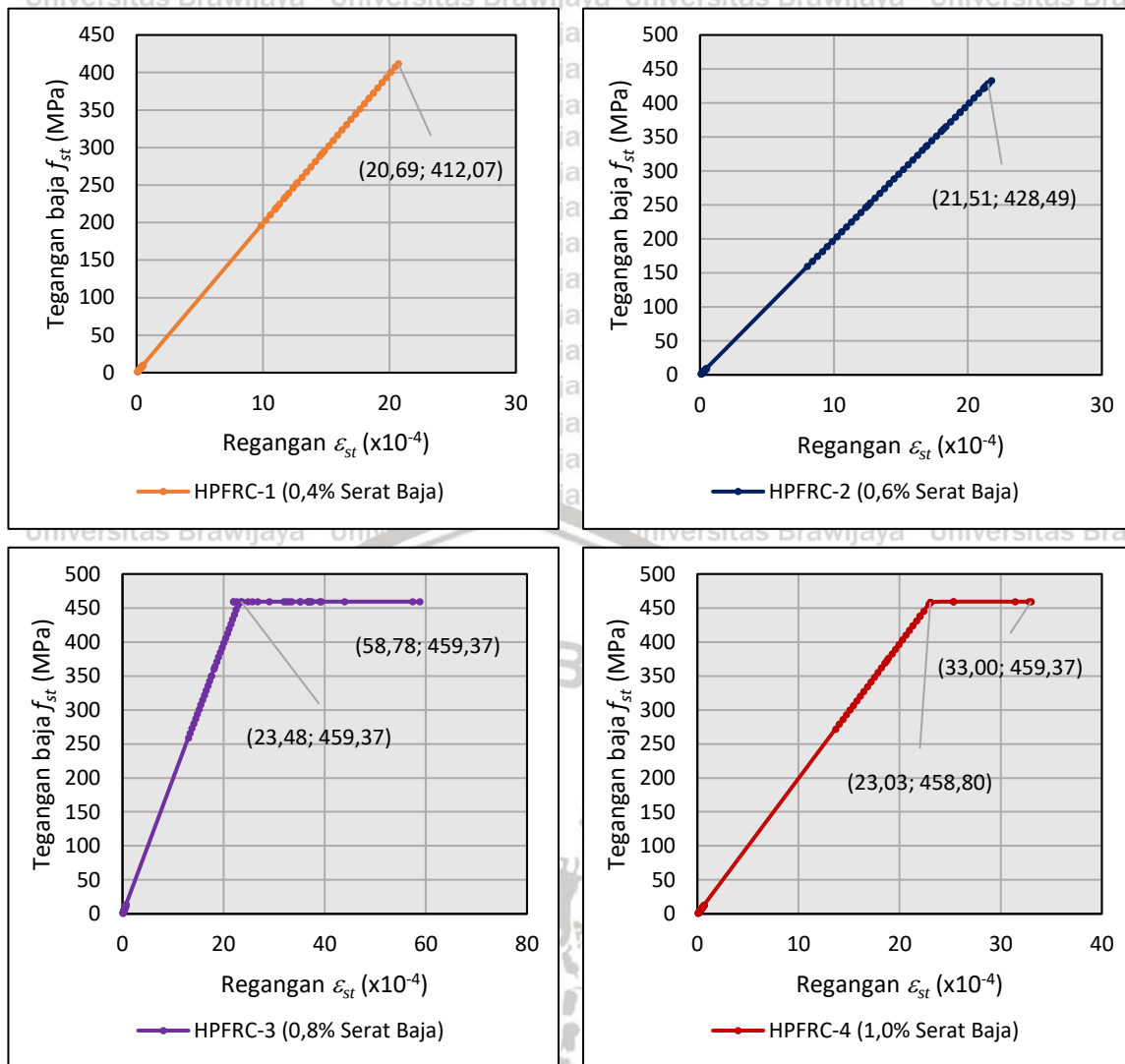
Gambar 5. 49 Tegangan-regangan beton hasil uji lentur pelat HPFRC

Diagram pada Gambar 5.49 ini menunjukkan bahwa pada saat pelat mengalami kegagalan (*failure*), sisi tekan beton serat kinerja tinggi belum mencapai nilai kuat tekan karakteristiknya. Hal ini terlihat dari besaran nilai regangan ε yang belum mencapai nilai 0,002. Pada kondisi ini bahan beton serat kinerja tinggi masih berada dalam kondisi elastis linier. Tabel 5.55 menunjukkan tegangan, regangan dan modulus elastisitas pelat beton serat kinerja tinggi saat kegagalan lentur.

Tabel 5. 55 Tegangan, Regangan dan Modulus Elastisitas Beton Serat Kinerja Tinggi

Pelat	f_c'	Tegangan f_c	Regangan ε_c	Luasan $f_c - \varepsilon_c$	Modulus Elastisitas
	MPa	MPa	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-3}$ MPa	MPa
HPFRC-1	54.35	22.47	0.00047	5.26	47,988.72
HPFRC-2	55.49	23.50	0.00048	5.66	48,810.77
HPFRC-3	60.68	38.22	0.00078	14.97	48,798.34
HPFRC-3	67.67	31.95	0.00055	8.74	58,417.67

Nilai modulus elastisitas beton pada Tabel 5.55 agak berbeda dibanding dengan modulus elastisitas yang dihitung menggunakan pembacaan data alat *ekstensometer* pada pengujian kuat tekan silinder beton tanpa serat baja (dari pengujian variasi silika fume tanpa serat baja) yang bernilai 31.612,91 MPa. Untuk selanjutnya nilai modulus elastisitas yang akan digunakan adalah sesuai dengan yang tertera pada Tabel 5.55.



Gambar 5. 50 Tegangan-regangan baja tulangan hasil uji lentur pelat HPFRC

Regangan baja tulangan diperoleh melalui perbandingan antara jarak sumbu netral ke sisi ekstrim beton tekan dan jarak sumbu netral ke tulangan baja dikalikan dengan regangan beton tekan ($\epsilon_{st} = \frac{(d-kd)}{kd} \epsilon_c$). Serupa dengan hubungan tegangan dan regangan pada beton, maka untuk pelat HPFRC yang diuji, bentuk hubungan tegangan-regangan baja hingga mengalami kegagalan pada saat uji lentur di laboratorium adalah seperti terlihat pada Gambar 5.50.

Luas bidang tegangan-regangan baja pelat HPFRC-1 adalah $0,5 \times 412,07 \times 20,69 \times 10^{-4} = 0,426$ MPa. Luas bidang tegangan-regangan baja pelat HPFRC-2 adalah $0,5 \times 428,49 \times 21,51 \times 10^{-4} = 0,461$ MPa. Pada saat terjadi keruntuhan pelat HPFRC-1 dan HPFRC-2, ternyata bahwa beton belum mencapai kuat tekan karakteristiknya, demikian pula baja masih belum mencapai nilai kuat lelehnya. Oleh karena itu keruntuhan yang terjadi tersebut

diakibatkan oleh kegagalan *slip* pada batang tulangan (*slippage of bar*) (Carpinteri, 1986, hal. 135).

Luasan bidang tegangan-regangan baja pelat HPFRC-3 adalah $[(0,5 \times 459,37 \times 23,48) + (459,37 \times (58,78 - 23,48))] \times 10^{-4} = 2,16$ MPa. Luasan bidang tegangan-regangan baja pelat HPFRC-4 adalah $[(0,5 \times 459,37 \times 23,03) + (459,37 \times (33,00 - 23,03))] \times 10^{-4} = 0,987$ MPa. Pada saat pelat HPFRC-3 dan HPFRC-4 mengalami kegagalan lentur, baja tulangan telah mencapai nilai kuat lelehnya ($f_y = 459,37$ MPa). Dengan demikian keruntuhan ini terjadi sesudah baja leleh atau *yielding of steel* (Carpinteri, 1986, hal. 135).

Tegangan, regangan dan modulus elastisitas baja pada saat terjadi kegagalan lentur pada pelat HPFRC dapat dilihat pada Tabel 5.56. Dari tabel tersebut terlihat bahwa nilai modulus elastisitas baja bernilai sama dengan hasil pengujian menggunakan alat *Static-Hydraulic Universal Test Systems* MTS, yaitu sebesar 199.182,32 MPa.

Tabel 5. 56 Tegangan-Regangan Baja saat Terjadi Kegagalan Pelat HPFRC

Pelat	Tegangan baja		Regangan	Luasan	Modulus
	f_y	f_s	ϵ_s	$(f_s \cdot \epsilon_s)$	Elastisitas E
	MPa	MPa	$\times 10^{-4}$	MPa	MPa
HPFRC-1	459,37	412,07	20,69	0,426	199.182,32
HPFRC-2	459,37	428,24	21,51	0,461	199.182,32
HPFRC-3	459,37	459,37	58,78	2,161	199.182,32
HPFRC-4	459,37	459,37	33,00	0,987	199.182,32

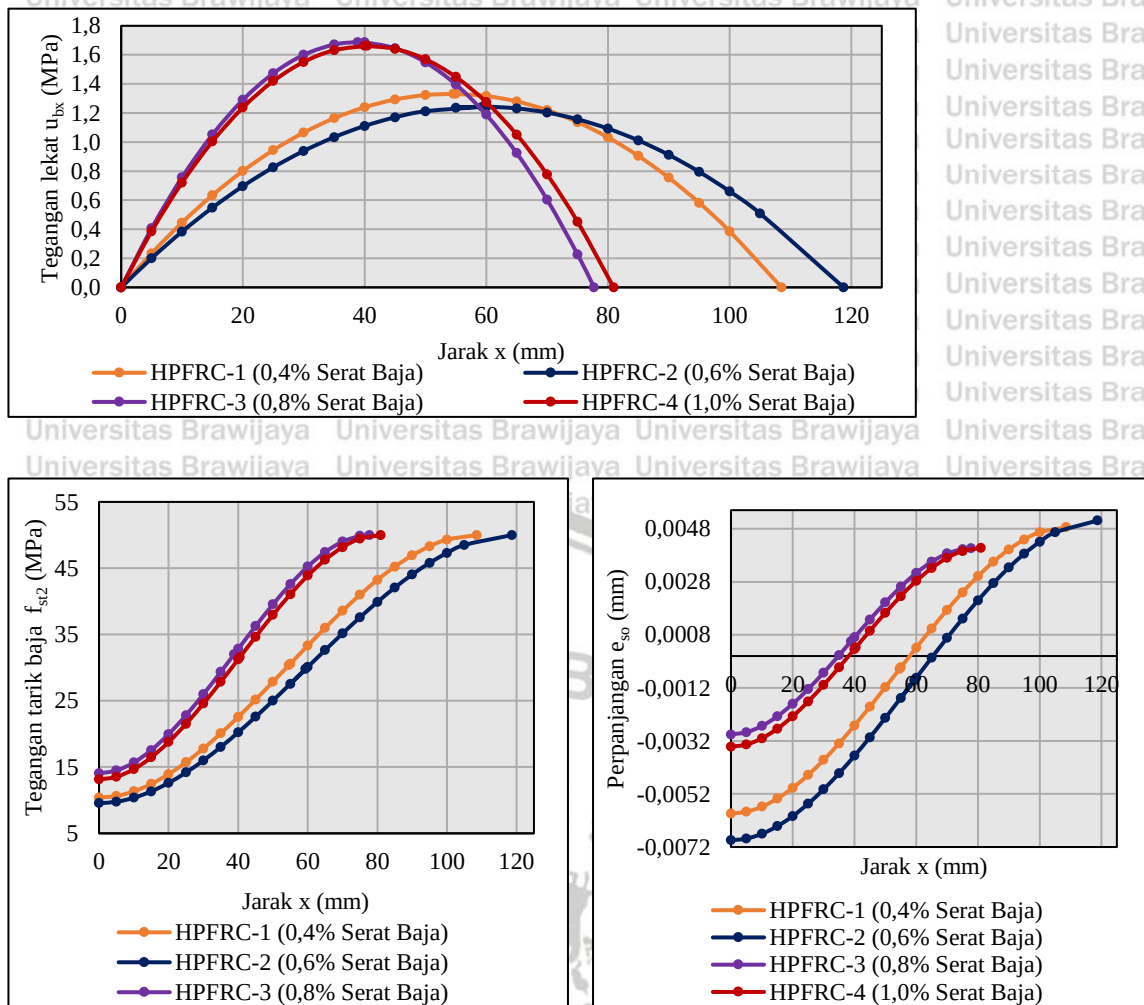
5.7.3 Analisis tegangan lekat

1. Tegangan lekat (*bond stress*) pada saat retak lentur pertama

Hasil analisis tegangan lekat pada keempat pelat HPFRC dapat dilihat pada Tabel 5.57 serta rinciannya pada Lampiran 9, 10, dan 11. Sedangkan distribusi tegangan lekat, distribusi tegangan baja, dan distribusi perpanjangan batang baja pada saat retak pertama dapat dilihat pada Gambar 5.51.

Tabel 5. 57 Tegangan Lekat Awal u_{b0} dan Panjang Segmen Retak Awal S_0

Pelat	f_c'	f_{st1}	f_{st2}	e_{s0}	e_{c0}	S_0	u_{b0}	S_0
	MPa	MPa	MPa	mm	mm	mm	MPa	mm
HPFRC-1	54,35	10,39	50,00	0,0049	0,0036	0,0012	1,33	108,54
HPFRC-2	55,49	9,55	50,00	0,0051	0,0040	0,0011	1,24	118,73
HPFRC-3	60,68	14,05	50,00	0,0041	0,0026	0,0014	1,69	77,72
HPFRC-4	67,67	13,13	50,00	0,0041	0,0027	0,0013	1,66	80,93



Gambar 5. 51 Distribusi tegangan lekat, tegangan tarik baja dan perpanjangan baja saat retak pertama pelat HPFRC

Jarak x (mm) pada Gambar 5.51 menunjukkan panjang segmen retak awal (S_o) untuk masing-masing pelat. Nilai tegangan lekat awal (u_{bo}) berkebalikan dengan panjang segmen retak awal (S_o). Hal ini terlihat untuk pelat HPFRC-3 yang memiliki tegangan lekat tertinggi ($u_{bo} = 1,69$ MPa), ternyata pelat tersebut memiliki panjang segmen retak awal S_o yang paling pendek ($S_o = 77,72$ mm). Sementara pelat HPFRC-2 yang memiliki tegangan lekat terendah ($u_{bo} = 1,24$ MPa) memiliki panjang segmen retak awal $S_o = 118,73$ mm. Tabel 5.57 menunjukkan bahwa tegangan tarik baja (f_{st}) lebih memberikan pengaruh pada besaran kuat lekat beton jika dibandingkan dengan kuat tekan beton (f_c'). Kuat tekan beton (f_c') sendiri baru akan terlihat pengaruhnya terhadap kuat lekat (u_{bo}), jika selisihnya nilainya cukup jauh seperti antara HPFRC-1 yang bernilai 54,35 MPa dengan kuat lekat 1,33 MPa dan HPFRC-3 yang bernilai 60,68 MPa dengan kuat lekat 1,69 MPa.

Gambar 5.51 juga memperlihatkan nilai tegangan baja pada saat retak pertama yang terjadi pada posisi *zero slip point* hingga mencapai panjang segmen retak awal S_o ketika

tegangan tarik f_{st} mencapai 50 MPa. Pada saat tegangan tarik ini mencapai nilai 50 MPa, nilai momen eksternal dalam hubungan *Moment-Curvature* merupakan nilai momen terkecil, sebelum meningkat lagi sejalan dengan meningkatnya tegangan tarik. Sementara itu dari diagram perpanjangan atau *elongation* tulangan baja terlihat bahwa perpanjangan yang terjadi juga sangat tergantung pada panjang segmen retak awal S_0 dan juga tergantung pada tegangan yang terjadi pada baja tulangan di sisi yang retak.

2. Tegangan lekat di antara retakan yang berdekatan

Untuk menentukan apakah analisis lekatan pada retakan kedua dan seterusnya dikategorikan sebagai retakan dengan bidang momen yang simetris atau berbeda, maka dilakukan perhitungan besaran momen yang terjadi pada segmen pelat HPFRC yang mengalami retakan kedua dan seterusnya hingga mendekati runtuh. Sesudah terjadi retakan kedua dan seterusnya, pada kedua ujung segmen pelat HPFRC awal yang mengalami retak yaitu pada posisi x_1 dan x_3 , serta pada posisi retakan x_2 , dihitung momen masing-masing dengan persamaan:

$$R_a = \frac{P}{2} + \frac{qL}{2} \quad (5-16a)$$

$$M = R_a x - \frac{1}{2} q x^2 \quad \text{untuk } 0 \leq x < \frac{1}{2} L \quad (5-16b)$$

$$M = \frac{1}{2} R_a L - \frac{1}{8} q L^2 \quad \text{untuk } x = \frac{1}{2} L \quad (5-16c)$$

$$M = R_a x - \frac{1}{2} q x^2 + P\left(\frac{1}{2} L - x\right) \quad \text{untuk } \frac{1}{2} L < x \leq L \quad (5-16d)$$

Tabel 5. 58 Momen Pada Ujung Kiri (x_1) dan Ujung Kanan (x_2) Segmen Tengah Pelat HPFRC-1

Kondisi Pelat	Beban	Berat Sendiri	Bentang	Reaksi	Jarak (x) dari tumpuan kiri			Momen pada	
			L	R_a	x_1	x_2	$\frac{1}{2} L$	x_1	x_2
	kN	kN/m'	m	kN	m	m	kN-m	kN-m	kN-m
Retak 2	12,91	1,80	1,60	7,89	0,68	0,78	5,74	4,95	5,61
Retak 3	14,58	1,80	1,60	8,73	0,68	0,78	6,41	5,52	6,26
Retak 4	15,56	1,80	1,60	9,22	0,68	0,78	6,80	5,85	6,64
Retak 5	16,74	1,80	1,60	9,81	0,68	0,78	7,27	6,25	7,10
Retak 6	19,54	1,80	1,60	11,21	0,68	0,78	8,39	7,20	8,19
Retak 7	21,74	1,80	1,60	12,31	0,68	0,78	9,27	7,95	9,05
Retak 8	26,49	1,80	1,60	14,68	0,68	0,78	11,17	9,57	10,90
Runtuh	27,94	1,80	1,60	15,41	0,68	0,78	11,75	10,06	11,47

Tabel 5. 59 Momen Pada Pada Ujung Kiri (x_1) dan Ujung Kanan (x_2) Segmen Tengah Pelat HPFRC-2

Kondisi Pelat	Beban	Berat Sendiri	Bentang	Reaksi	Jarak (x) dari tumpuan kiri		Momen pada		
			L	Ra	x_1	x_2	$\frac{1}{2} L$	x_1	x_2
	kN	kN/m'	m	kN	m	m	kN-m	kN-m	kN-m
Retak 2	15,86	1,80	1,60	9,37	0,78	0,84	6,92	6,76	6,58
Retak 3	16,56	1,80	1,60	9,72	0,78	0,84	7,20	7,03	6,84
Retak 4	18,31	1,80	1,60	10,59	0,78	0,84	7,90	7,72	7,50
Retak 5	22,64	1,80	1,60	12,76	0,78	0,84	9,63	9,40	9,14
Retak 6	24,41	1,80	1,60	13,64	0,78	0,84	10,34	10,10	9,81
Retak 7	26,17	1,80	1,60	14,52	0,78	0,84	11,04	10,78	10,48
Runtuh	29,12	1,80	1,60	16,00	0,78	0,84	12,22	11,93	11,60

Tabel 5. 60 Momen Pada Pada Ujung Kiri (x_1) dan Ujung Kanan (x_2) Segmen Tengah Pelat HPFRC-3

Kondisi Pelat	Beban	Berat Sendiri	Bentang	Reaksi	Jarak (x) dari tumpuan kiri		Momen pada		
			L	Ra	x_1	x_2	$\frac{1}{2} L$	x_1	x_2
	kN	kN/m'	m	kN	m	m	kN-m	kN-m	kN-m
Retak 2	19,78	1,80	1,60	11,33	0,69	0,78	8,49	7,39	8,24
Retak 3	20,76	1,80	1,60	11,82	0,69	0,78	8,88	7,73	8,62
Retak 4	22,72	1,80	1,60	12,80	0,69	0,78	9,66	8,40	9,38
Retak 5	24,44	1,80	1,60	13,66	0,69	0,78	10,35	9,00	10,05
Retak 6	25,67	1,80	1,60	14,27	0,69	0,78	10,84	9,42	10,52
Retak 7	27,63	1,80	1,60	15,25	0,69	0,78	11,63	10,10	11,28
Retak 8	30,57	1,80	1,60	16,72	0,69	0,78	12,80	11,11	12,42
Retak 9	31,55	1,80	1,60	17,21	0,69	0,78	13,20	11,45	12,80
Runtuh	32,35	1,80	1,60	17,61	0,69	0,78	13,51	11,72	13,11

Tabel 5. 61 Momen Pada Pada Ujung Kiri (x_1) dan Ujung Kanan (x_2) Segmen Tengah Pelat HPFRC-4

Kondisi Pelat	Beban	Berat Sendiri	Bentang	Reaksi	Jarak (x) dari tumpuan kiri		Momen pada		
			L	Ra	x_1	x_2	$\frac{1}{2} L$	x_1	x_2
	kN	kN/m'	m	kN	m	m	kN-m	kN-m	kN-m
Retak 2	20,76	1,80	1,60	11,82	0,58	0,77	8,88	6,58	8,57
Retak 3	21,25	1,80	1,60	12,06	0,58	0,77	9,08	6,73	8,76
Retak 4	23,71	1,80	1,60	13,29	0,58	0,77	10,06	7,44	9,70
Retak 5	25,41	1,80	1,60	14,14	0,58	0,77	10,74	7,94	10,36
Retak 6	26,65	1,80	1,60	14,76	0,58	0,77	11,23	8,30	10,83
Retak 7	28,61	1,80	1,60	15,74	0,72	0,77	12,02	10,91	11,59
Retak 8	30,02	1,80	1,60	16,45	0,72	0,77	12,58	11,42	12,13
Retak 9	31,51	1,80	1,60	17,19	0,72	0,77	13,18	11,96	12,71
Retak 10	31,68	1,80	1,60	17,28	0,72	0,77	13,25	12,02	12,77
Runtuh	32,04	1,80	1,60	17,46	0,72	0,77	13,393	12,15	12,91

Dari hasil perhitungan pada tabel 5.58 hingga tabel 5.61 tersebut, dapat disusun besaran momen M_1 dan M_2 pada segmen pelat terpendek di tengah pelat dengan panjang segmen pelat S setelah retak sebagaimana terlihat pada Tabel 5.62. Dari tabel ini terlihat bahwa tegangan lekat di antara retakan yang berdekatan harus dianalisis sebagai bidang momen yang berbeda.

Tabel 5. 62 Momen dan Panjang Segmen Pelat HPFRC

Kondisi Pelat	HPFRC-1			HPFRC-2		
	M_1	M_2	S	M_1	M_2	S
	kN-m	kN-m	m	kN-m	kN-m	m
Retak 2	4,953	5,611	0,100	6,759	6,575	0,063
Retak 3	5,520	6,262	0,100	7,035	6,843	0,063
Retak 4	5,854	6,644	0,100	7,716	7,504	0,063
Retak 5	6,254	7,103	0,100	9,403	9,141	0,063
Retak 6	7,204	8,194	0,100	10,095	9,813	0,063
Retak 7	7,955	9,055	0,100	10,780	10,478	0,063
Retak 8	9,568	10,904	0,100			
Runtuh	10,063	11,473	0,100	12,223	11,932	0,063

Kondisi Pelat	HPFRC-3			HPFRC-4		
	M_1	M_2	S	M_1	M_2	S
	kN	kN	cm	kN	kN	cm
Retak 2	7,389	8,240	0,085	6,585	8,568	0,187
Retak 3	7,727	8,620	0,085	6,728	8,757	0,187
Retak 4	8,404	9,380	0,085	7,443	9,701	0,187
Retak 5	8,996	10,045	0,085	7,940	10,358	0,187
Retak 6	9,419	10,521	0,085	8,301	10,834	0,187
Retak 7	10,096	11,281	0,085	10,912	11,589	0,047
Retak 8	11,112	12,421	0,085	11,423	12,133	0,047
Retak 9	11,450	12,801	0,085	11,962	12,707	0,047
Retak 10				12,022	12,771	0,047
Runtuh	11,724	13,109	0,085	12,154	12,911	0,047

Tegangan lekat untuk pelat HPFRC-1 dapat dilihat pada Tabel 5.63. Parameter pada tabel ini meliputi tegangan lekat akibat kedua momen, tegangan baja tarik pada ujung segmen retak, panjang segmen retak S_x dan S_y , dan panjang *slip* s_0 sebagai selisih antara perpanjangan baja tulangan dan beton yang terjadi pada saat retakan terjadi.

Tabel 5. 63 Tegangan Lekat, Tegangan Tarik Baja Tulangan dan Panjang Segmen Retak serta Panjang Slip pada Pelat HPFRC-1

Kondisi	u_{b0}	u'_{b0}	f_{s2}	f_{s3}	S	S_x	S_y	S_0
Pelat	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	mm	mm	mm	mm
Retak 2	4,989	5,697	166,94	191,51	100,00	44,92	55,08	0.0154
Retak 3	5,241	5,951	188,15	215,34	100,00	44,30	55,70	0.0181
Retak 4	5,367	6,023	200,43	229,25	100,00	43,65	56,35	0.0197
Retak 5	5,510	6,111	215,06	245,85	100,00	42,92	57,08	0.0216
Retak 6	5,869	6,333	249,48	285,05	100,00	41,27	58,73	0.0261
Retak 7	5,960	6,479	276,47	315,86	100,00	40,53	59,47	0.0297
Retak 8	6,113	6,836	334,17	381,86	100,00	39,35	60,65	0.0374
Runtuh	6,158	6,948	351,85	402,07	100,00	39,03	60,97	0.0397

Pada tabel 5.64 menunjukkan perkembangan nilai tegangan lekat, tegangan tarik baja tulangan dan panjang segmen retak S_x dan S_y , serta panjang *slip* s_0 pada segmen pelat HPFRC-2. Dari tabel ini terlihat bahwa panjang *slip* sebesar 0,0154 mm pada saat terbentuk celah retakan kedua hingga 0,0397 mm pada saat runtuh.

Tabel 5. 64 Tegangan Lekat, Tegangan Tarik Baja Tulangan dan Panjang Segmen Retak serta Panjang Slip pada Pelat HPFRC-2

Kondisi	u_{b0}	u'_{b0}	f_{s2}	f_{s3}	S	S_x	S_y	S_0
Pelat	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	mm	mm	mm	mm
Retak 2	5,401	5,152	233,19	226,55	63,00	33,05	29,95	0.0144
Retak 3	5,831	5,757	243,16	236,23	63,00	33,48	29,52	0.0151
Retak 4	5,751	5,438	267,65	260,05	63,00	33,10	29,90	0.0170
Retak 5	6,370	5,934	327,99	318,65	63,00	33,15	29,85	0.0216
Retak 6	6,156	5,999	352,67	342,62	63,00	34,11	28,89	0.0235
Retak 7	6,230	6,051	377,06	366,30	63,00	34,24	28,76	0.0254
Runtuh	6,373	6,179	428,56	418,14	63,00	34,04	28,96	0.0294

Tegangan lekat, tegangan tarik baja tulangan, panjang segmen retak S_x dan S_y dan panjang *slip* pelat HPFRC-3 dapat dilihat pada Tabel 5.65. Tegangan lekat terbesar terjadi pada saat pelat runtuh, yaitu mencapai nilai 9,023 MPa untuk sisi kiri segmen pelat dan 9,263 MPa untuk sisi kanan segmen pelat. Sementara itu panjang *slip* memiliki nilai antara 0,0228 mm pada saat terbentuk celah retak kedua dan 0,0426 mm pada saat pelat runtuh.

Tabel 5. 65 Tegangan Lekat, Tegangan Tarik Baja Tulangan dan Panjang Penyaluran Pada Segmen Pelat HPFRC-3

Kondisi	u_{b0}	u'_{b0}	f_{s2}	f_{s3}	S	S_x	S_y	S_0
Pelat	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	mm	mm	mm	mm
Retak 2	6,100	7,074	254,99	287,46	85,00	36,65	48,35	0.0228
Retak 3	6,561	6,169	298,89	264,03	85,00	51,18	33,82	0.0238
Retak 4	7,059	5,920	287,91	242,01	85,00	51,67	33,33	0.0220
Retak 5	7,478	7,762	349,51	357,33	85,00	41,42	43,58	0.0308
Retak 6	6,497	5,989	272,12	221,90	85,00	55,45	29,55	0.0203
Retak 7	6,088	6,986	284,54	354,24	85,00	25,97	59,03	0.0287
Retak 8	6,115	7,548	262,46	315,31	85,00	32,84	52,16	0.0248
Retak 9	6,665	6,160	271,22	247,73	85,00	47,51	37,49	0.0214
Runtuh	9,023	9,263	472,40	472,40	85,00	43,06	41,94	0.0426

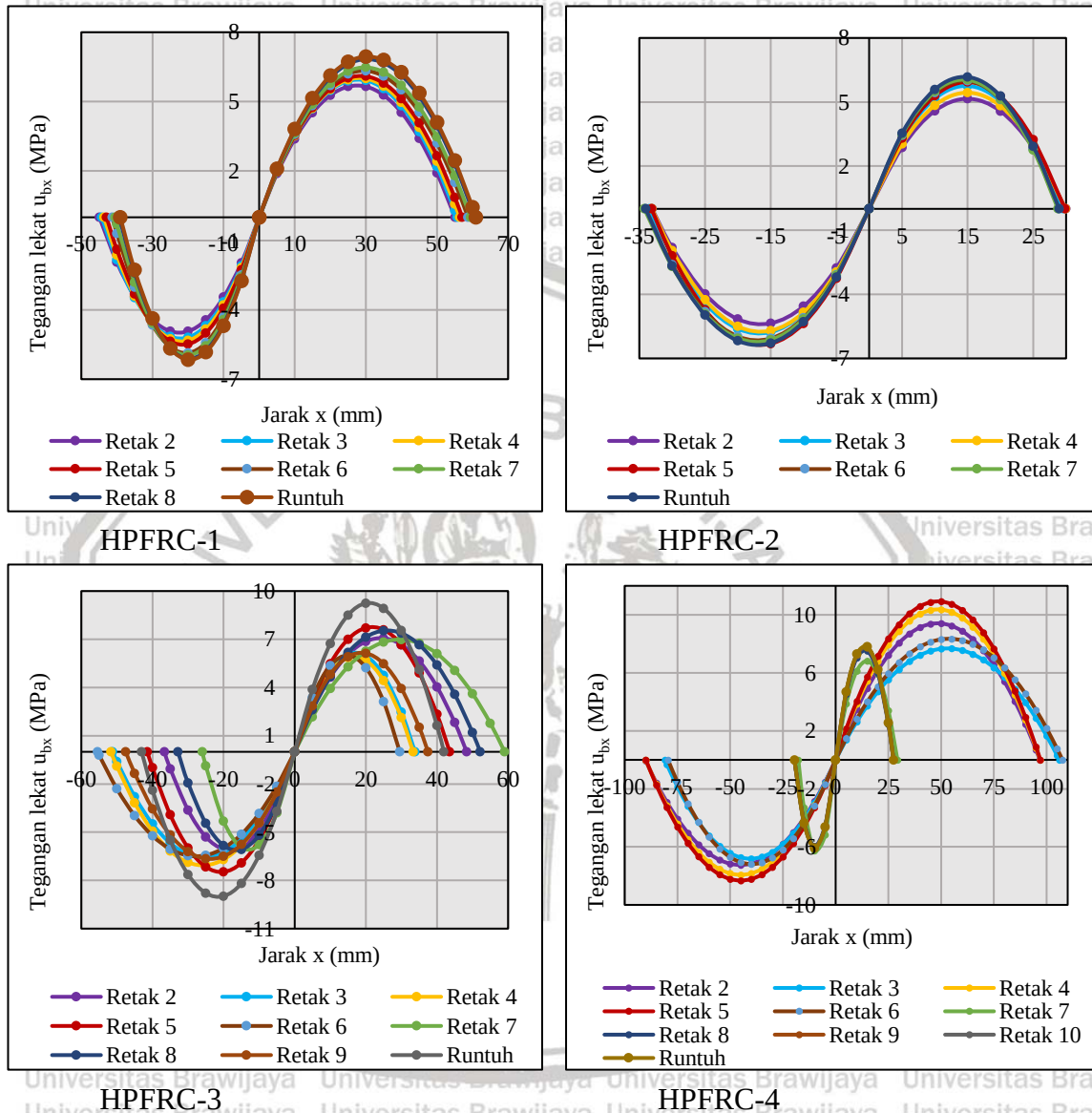
Pada analisis tegangan lekat untuk pelat HPFRC-4, terdapat perubahan panjang segmen retak S_x dan S_y yang disebabkan karena terjadinya celah retak baru dekat pertengahan bentang pada saat retak ke-7. Hal ini mengakibatkan panjang segmen retak tegangan lekat berubah. Rincian besar tegangan lekat, tegangan tarik baja tulangan, panjang segmen retak S_x dan S_y dan panjang *slip* dapat dilihat pada Tabel 5.66.

Tabel 5. 66 Tegangan Lekat, Tegangan Tarik Baja Tulangan dan Panjang Segmen Retak serta Panjang Slip pada Pelat HPFRC-4

Kondisi	u_{b0}	u'_{b0}	f_{s2}	f_{s3}	S	S_x	S_y	S_0
Pelat	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	mm	mm	mm	mm
Retak 2	7,248	9,416	225,21	295,76	187,00	90,22	96,78	0.0330
Retak 3	6,817	7,683	230,34	302,42	187,00	80,94	106,06	0.0381
Retak 4	7,928	10,373	255,83	335,77	187,00	90,06	96,94	0.0390
Retak 5	8,320	10,928	273,51	358,94	187,00	89,97	97,03	0.0426
Retak 6	7,191	8,349	286,29	375,71	187,00	79,48	107,52	0.0521
Retak 7	6,370	6,818	378,48	402,32	47,00	17,70	29,30	0.0204
Retak 8	5,955	7,583	396,47	421,47	47,00	19,59	27,41	0.0214
Retak 9	6,047	7,799	415,45	441,68	47,00	19,56	27,44	0.0225
Retak 10	6,057	7,823	417,57	443,94	47,00	19,56	27,44	0.0226
Runtuh	6,079	7,876	422,20	448,86	47,00	19,55	27,45	0.0229

Diagram distribusi tegangan lekat di tengah bentang pada retakan kedua hingga runtuh pada pelat HPFRC dapat dilihat pada Gambar 5.52. Terlihat bahwa terjadi pergeseran panjang segmen retak antara sisi kiri S_x dan sisi kanan S_y pada pelat HPFRC-1. Peningkatan tegangan lekat yang terjadi disamping diikuti oleh bertambahnya panjang *slip* s_0 juga menunjukkan pergeseran panjang segmen retak S_x dan S_y . Tegangan lekat pada pelat HPFRC-3 agak berfluktuasi, hal ini sesuai dengan fluktuasi yang terjadi pada tegangan tarik baja pada masing-masing ujung retakan. Akibatnya pada penggambaran distribusi tegangan

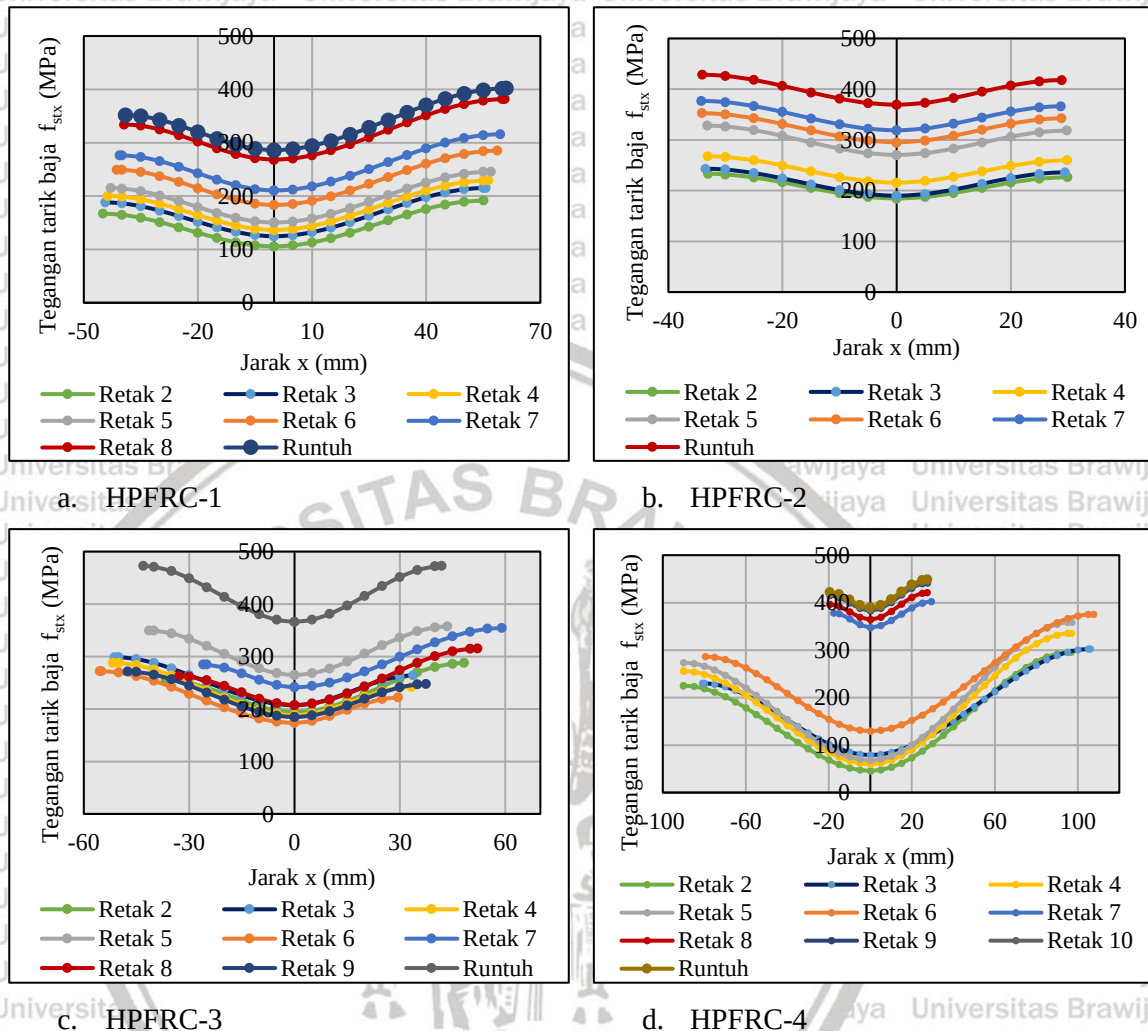
lekat juga tidak terlihat keteraturan penambahan nilai tegangan lekat maupun pergeseran panjang segmen retak S_x dan S_y sebagaimana yang terjadi pada pelat HPFRC-1 dan HPFRC-2. Distribusi tegangan lekat pelat HPFRC-4 menunjukkan adanya perubahan panjang segmen S yang semula dengan panjang 187 mm berubah menjadi 47 mm.



Gambar 5. 52 Tegangan lekat pelat HPFRC untuk retak kedua hingga runtuh

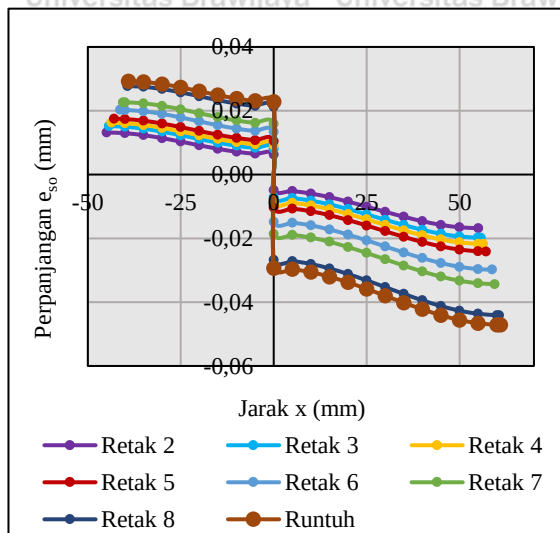
Distribusi tegangan tarik baja ditampilkan pada Gambar 5.53. Diagram ini juga menunjukkan pola pergeseran panjang segmen pelat HPFRC-1. Pada saat runtuh, sisi kanan memiliki panjang segmen retak S_y yang lebih panjang dibanding saat retak kedua. Sementara sisi kiri panjang segmen retak S_x justru semakin pendek. Untuk pelat HPFRC-3, sebagaimana distribusi tegangan lekat, pada diagram ini juga menunjukkan ketidak teraturan peningkatan nilai tegangan tarik baja tulangan pada saat terbentuk celah retakan. Untuk pelat HPFRC-4 terlihat bahwa perubahan panjang segmen pelat S menimbulkan perbedaan

perilaku tegangan tarik baja tulangan. Pada gambar terlihat pengelompokan yang sangat berbeda antara tegangan tarik baja tulangan dengan panjang segmen pelat 187 mm jika dibandingkan dengan yang terjadi pada panjang segmen pelat 47 mm.

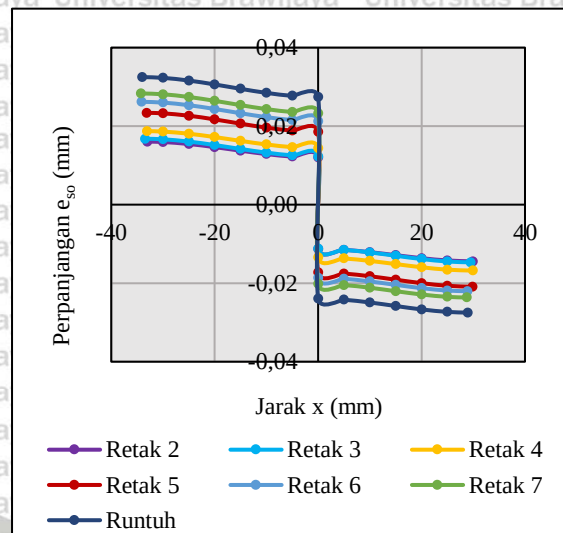


Gambar 5.53 Tegangan tarik baja HPFRC untuk retak kedua hingga runtuh

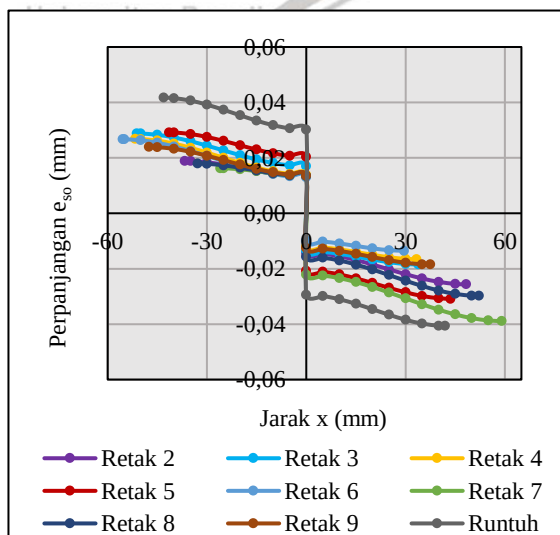
Distribusi perpanjangan baja tulangan pelat HPFRC setiap kali terbentuk celah retakan dapat dilihat pada Gambar 5.54. Jika ditinjau dari pembahasan tentang gaya dalam sebelumnya, pelat HPFRC-3 baru mengalami kegagalan lentur setelah baja tulangan mengalami leleh. Hal ini diduga berpengaruh pula terhadap analisis tegangan lekat maupun perpanjangan tulangan baja tarik. Sebagai konsekuensi dari perubahan panjang segmen retak pada pelat HPFRC-4, maka terlihat juga perbedaan distribusi perpanjangan baja tulangan.



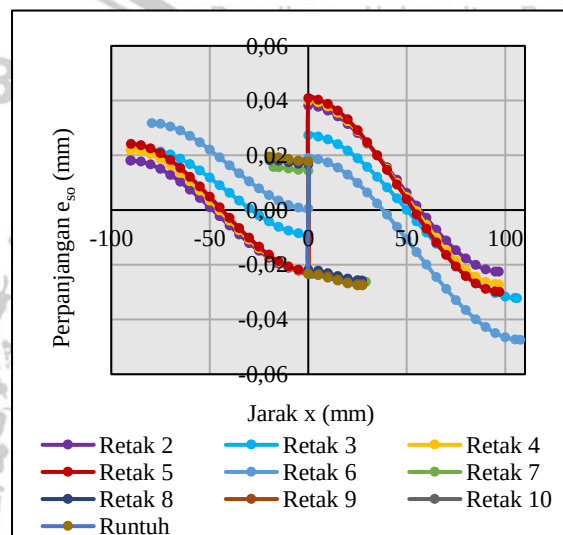
a. HPFRC-1



b. HPFRC-2



c. HPFRC-3



d. HPFRC-4

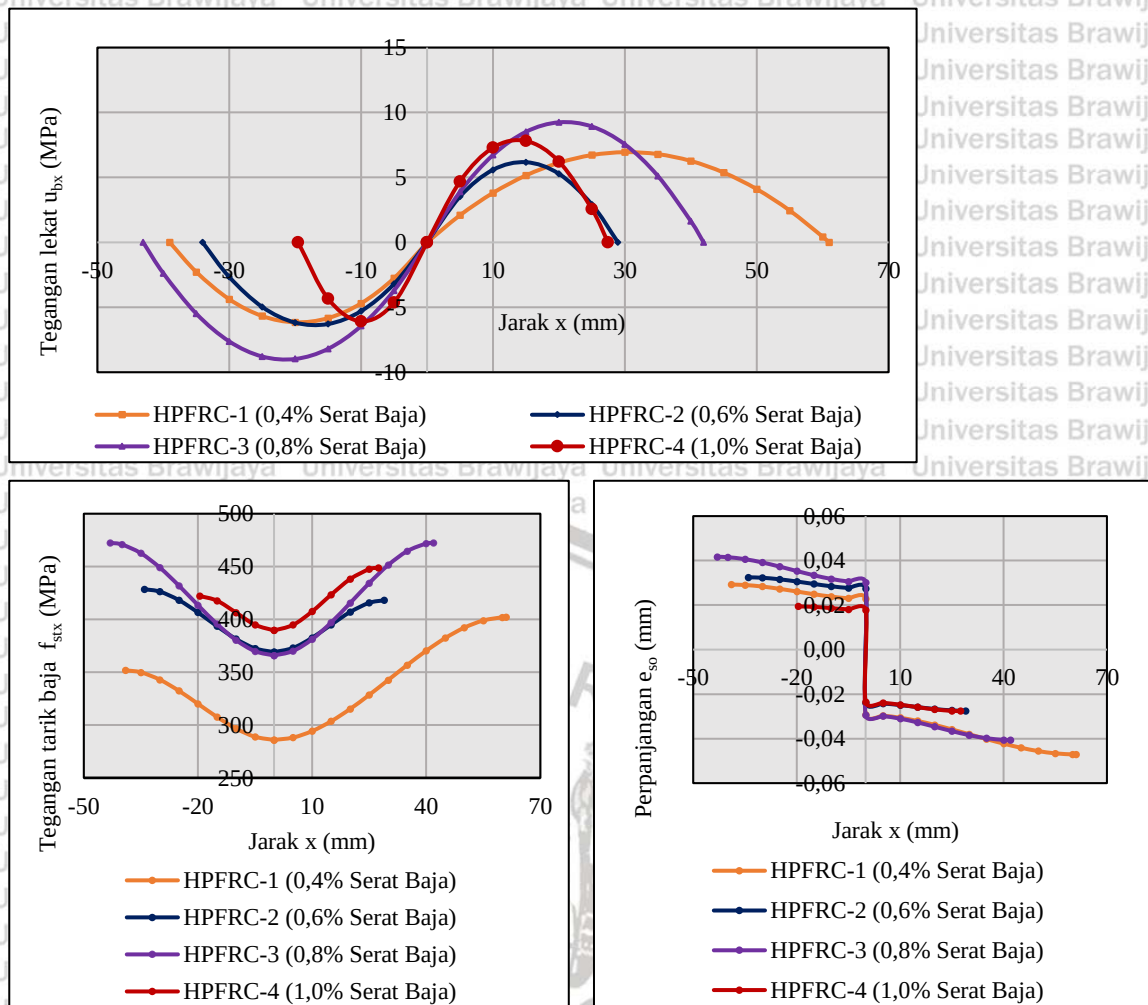
Gambar 5.54 Perpanjangan batang baja HPFRC untuk retak kedua hingga runtuh

3. Tegangan lekat (Bond Stress) pada saat pelat mengalami kegagalan lentur

Nilai-nilai tegangan lekat, tegangan tarik baja tulangan dan panjang segmen retak pada masing-masing segmen pelat pada saat pelat HPFRC mengalami kegagalan lentur dapat dilihat pada Tabel 5.67.

Tabel 5.67 Tegangan Lekat, Tegangan Tarik Baja Tulangan dan Panjang Segmen Retak Pada Segmen Pelat HPFRC Saat Runtuh (Failure)

Kondisi Pelat	f_c' MPa	u_{b0} Mpa	u'_{b0} Mpa	f_{s2} Mpa	f_{s3} Mpa	S mm	S_x mm	S_y mm	f_{sl} Mpa
HPFRC-1	54,35	6,158	6,948	351,85	402,07	100,00	39,03	60,97	285,98
HPFRC-2	55,49	6,373	6,179	428,56	418,14	63,00	34,04	28,96	369,10
HPFRC-3	60,68	9,023	9,263	472,40	472,40	85,00	43,06	41,94	365,92
HPFRC-4	67,67	6,079	7,876	422,20	448,86	47,00	19,55	27,45	389,62



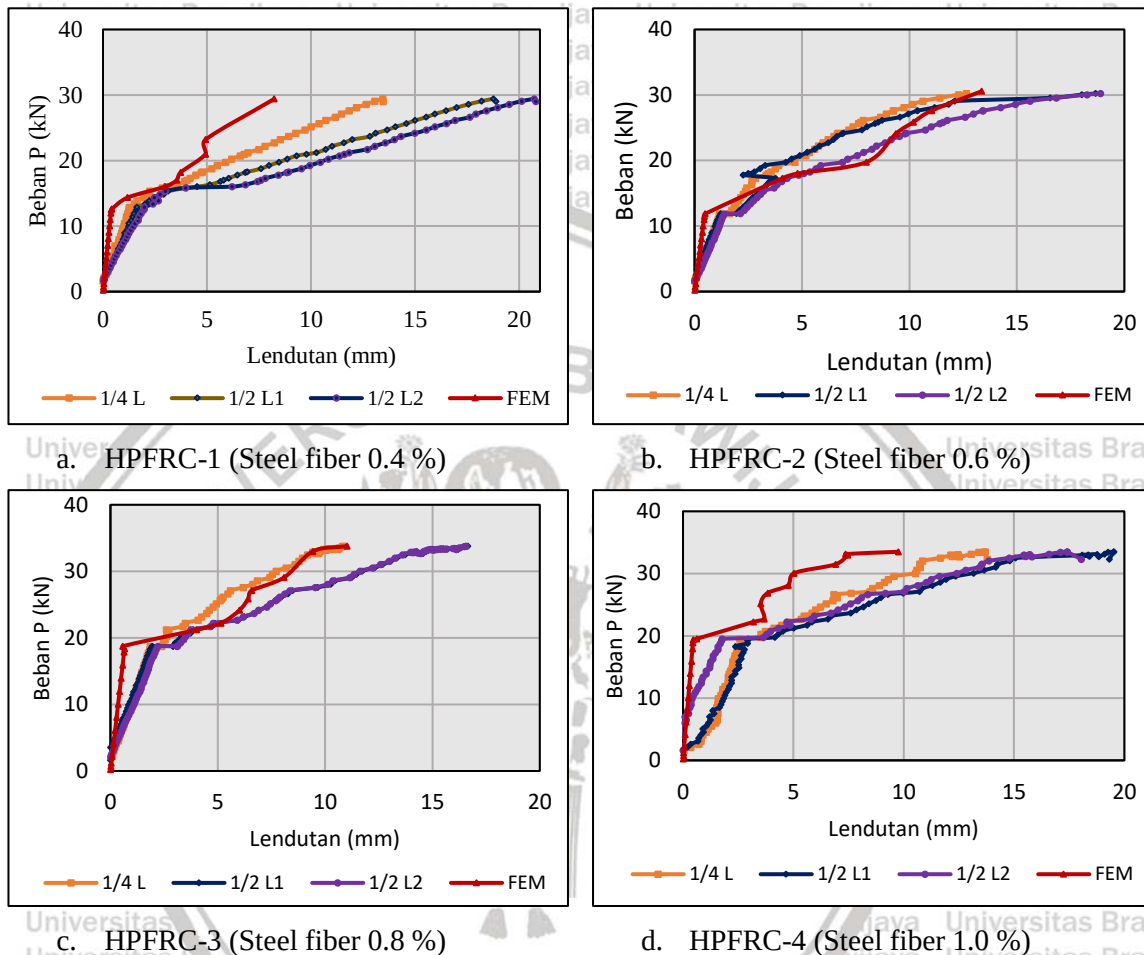
Gambar 5.55 Distribusi tegangan lekat, tegangan tarik baja dan perpanjangan baja pada saat mengalami kegagalan lentur

Distribusi tegangan lekat, tegangan tarik baja dan perpanjangan tulangan baja sepanjang segmen pelat pada saat runtuh dapat dilihat pada Gambar 5.55. Terlihat bahwa tegangan lekat terdistribusi sesuai dengan panjang segmen retakannya. Nilai tegangan lekat pada masing-masing ujung retakan adalah nol. Tegangan tarik terbesar terjadi pada ujung-ujung retakan. Sementara pada lokasi dimana tegangan lekat bernilai nol di pertengahan segmen, nilai tegangan tariknya adalah terkecil. Apabila perpanjangan tulangan baja dihitung selisihnya dengan perpanjangan beton pada level tulangan yang sama dan dikumulatiffkan dengan yang terjadi pada saat terbentuk retakan sebelumnya, maka lebar retak pada saat pelat HPFRC mengalami keruntuhan dapat diketahui. Hal ini akan dibahas dalam pembahasan lebar retak berdasarkan tegangan lekat dan panjang slip pada sub bab 5.7.4.

5.7.4 Lendutan pelat beton serat kinerja tinggi

Pembacaan lendutan pelat beton serat kinerja tinggi diperoleh dari pemeriksaan deformasi menggunakan LVDT sebanyak 3 unit. Pembacaan dilaksanakan pada jarak $\frac{1}{4}$ bentang (1 buah LVDT) dan $\frac{1}{2}$ bentang (2 buah LVDT) yang diukur dari tumpuan pelat.

Hubungan antara beban dan lendutan dapat digambarkan pada Gambar 5.56.



Gambar 5.56 Hubungan beban-lendutan pada uji lentur pelat HPFRC

Sebagai pembandingan dilakukan analisis lendutan dengan metode elemen hingga isoparametrik 2 dimensi. Pada analisis ini, beban dan momen inersia efektif yang digunakan adalah seperti pada tabel 5.68. Hubungan antara beban dan lendutan yang terjadi pada keempat pelat menunjukkan bahwa lendutan pada pelat HPFRC berperilaku bi-linier.

Perubahan sudut kemiringan lendutan terjadi setelah terjadinya retakan pertama yang menyebabkan terjadinya penurunan nilai momen inersia efektif pelat.

Tabel 5. 68 Beban P dan Momen Inersia efektif Pelat HPFRC

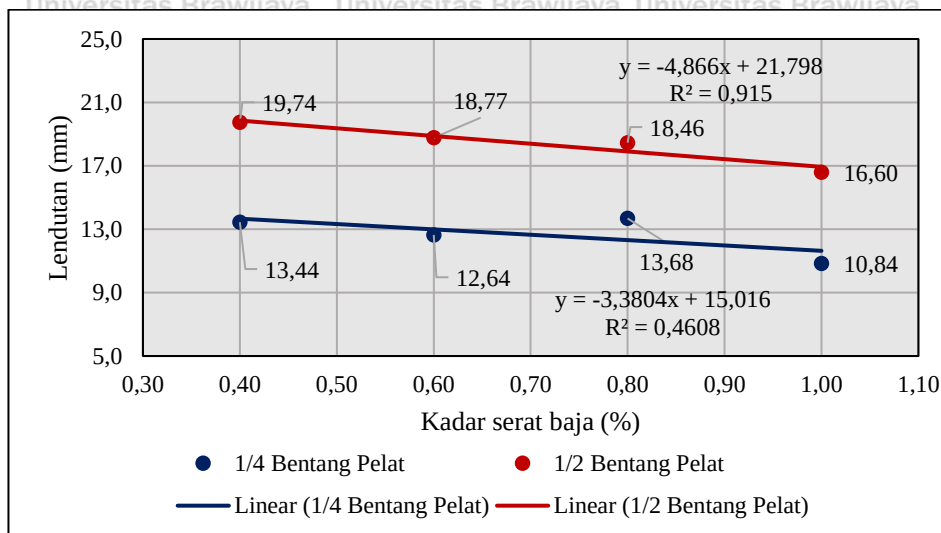
Kondisi Pelat	HPFRC-1		HPFRC-2		HPFRC-3		HPFRC-4	
	Beban P	I_{eff}	Beban P	I_{eff}	Beban P	I_{eff}	Beban P	I_{eff}
	kN	mm ⁴	kN	mm ⁴	kN	mm ⁴	kN	mm ⁴
Awal	0,195	38.400.000	0,199	38.400.000	0,218	38.400.000	0,243	38.400.000
Retak 1	12,606	37.307.660	11,855	37.394.499	18,755	36.934.183	19,516	37.031.666
Retak 2	14,352	415.838	17,300	321.166	21,227	231.803	22,223	192.461
Retak 3	16,020	360.904	18,006	307.205	22,208	222.526	22,714	188.777
Retak 4	17,001	336.374	19,752	279.088	24,170	207.246	25,166	173.453
Retak 5	18,178	312.257	24,078	234.131	25,887	196.617	26,873	165.151
Retak 6	20,974	270.753	25,854	221.880	27,113	190.228	28,109	160.054
Retak 7	23,181	248.131	27,610	212.027	29,075	181.645	30,071	153.224
Retak 8	27,924	216.449			32,018	171.665	31,484	149.073
Retak 9					32,999	144.558	32,975	145.278
Retak 10							33,142	125.163
Runtuh	29,381	209.696	30,563	199.199	33,794	43.610	33,505	82.483

Tabel 5.69 menampilkan nilai beban yang bekerja dan lendutan yang terjadi pada posisi $\frac{1}{4}$ bentang dan $\frac{1}{2}$ bentang, serta lendutan yang dihitung dengan metode elemen hingga. Data tersebut selanjutnya digunakan untuk menggambar pengaruh penambahan serat terhadap lendutan yang terjadi sebagaimana terlihat pada Gambar 5.57.

Tabel 5. 69 Lendutan Pada Saat Pelat HPFRC Mengalami Kegagalan Lentur

Pelat	Beban	Lendutan				FEM
	P	$\frac{1}{4} L$	$\frac{1}{2} L_1$	$\frac{1}{2} L_2$	$\frac{1}{2} L_{rata2}$	
	kN	mm	mm	mm	Mm	mm
HPFRC-1 (0,4%)	29,381	13.440	18.760	20.720	19.740	8.219
HPFRC-2 (0,6%)	30,563	12.640	18.660	18.880	18.770	13.351
HPFRC-3 (0,8%)	33,794	13.679	19.522	17.395	18.458	9.753
HPFRC-4 (1,0%)	33,505	10.840	16.640	16.560	16.600	11.027

Dari gambar 5.57 terlihat bahwa penambahan kadar serat mampu menurunkan lendutan yang terjadi pada saat pelat mengalami keruntuhan dengan persamaan $y = -4,866x + 21,798$ dan tingkat korelasi $R^2 = 0,915$. Dengan tingkat korelasi yang tinggi tersebut membuktikan bahwa serat baja dapat meningkatkan kemampuan beton untuk meningkatkan kuat tarikanya.



Gambar 5. 57 Pengaruh penambahan kadar serat terhadap lendutan pada uji lentur pelat HPFRC

5.7.5 Korelasi kadar serat, sifat mekanik, dan lendutan pelat HPFRC satu arah

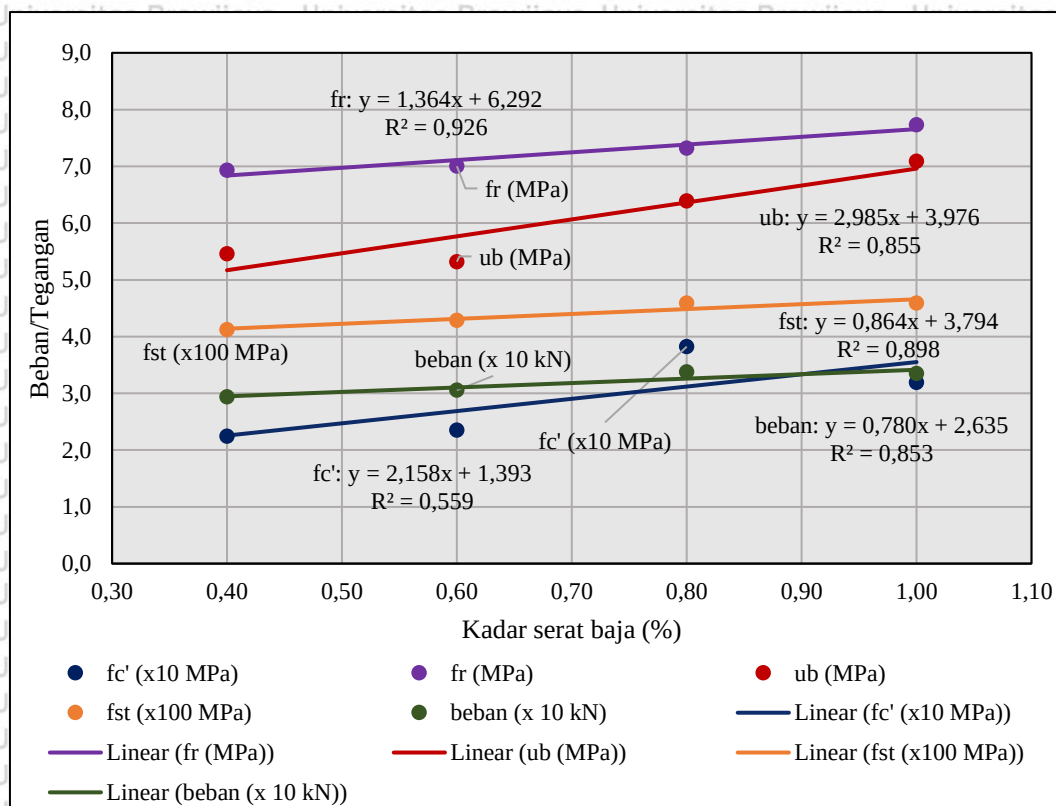
Dalam rangka mengidentifikasi pengaruh lekatan (*bond effect*) terhadap perilaku lentur dan perilaku lebar retak pada pelat beton serat kinerja tinggi satu arah yang diberi perlakuan berupa variasi komposisi serat, maka terlebih dahulu disusun data beban dan sifat mekanik pelat HPFRC yang teridentifikasi pada keempat pelat HPFRC sebagaimana terlihat pada Tabel 5.70. Di samping itu data nilai lendutan yang terjadi pada saat pelat HPFRC mengalami kegagalan lentur sebagaimana terlihat pada Tabel 5.69 juga diperhatikan.

Tabel 5. 70 Beban dan Sifat Mekanik Pelat HPFRC Hasil Eksperimen

Pelat	Beban	Sifat mekanik pelat HPFRC			
	P kN	f_c' MPa	f_r MPa	u_b MPa	f_s MPa
HPFRC-1 (0,4%)	29,381	54,35	6,93	5,73	412,07
HPFRC-2 (0,6%)	30,563	55,49	7,00	5,60	428,49
HPFRC-3 (0,8%)	33,794	60,68	7,32	6,66	459,37
HPFRC-4 (1,0%)	33,505	67,67	7,73	7,40	459,37

Apabila kadar serat pada masing-masing pelat HPFRC, dihubungkan dengan beban maksimum dan nilai-nilai tegangan maksimum pelat HPFRC pada saat terjadi keruntuhan pelat, yang meliputi kuat tekan beton f_c' ($\times 10$ MPa), kuat tarik beton f_r (MPa), kuat tarik baja f_s ($\times 100$ MPa), dan kuat lekat beton u_b (MPa), maka diagram hubungan kadar serat dan sifat mekanik pelat HPFRC tersebut dapat digambarkan sebagaimana terlihat pada Gambar 5.58. Kadar serat diurutkan nilainya dari kecil hingga yang terbesar dan diplotting pada sumbu datar. Sedangkan besar beban saat runtuh dan tegangan pelat HPFRC disusun sebagai

sumbu tegak. Nilai beban maksimum, kuat tekan beton, kuat tarik beton dan kuat tarik baja sengaja dibagi nilai tertentu agar dapat digambarkan dalam satu diagram yang sama.



Gambar 5. 58 Hubungan beban dengan sifat mekanik pelat HPFRC

Dari gambar 5.58 terlihat bahwa pada umumnya, penambahan kadar serat baja tulangan akan meningkatkan kapasitas sifat mekanik pelat HPFRC berupa meningkatkan kemampuan pelat tersebut menahan beban yang berakibat pula pada peningkatan nilai-nilai kapasitas tegangan pada saat pelat HPFRC mengalami keruntuhan.

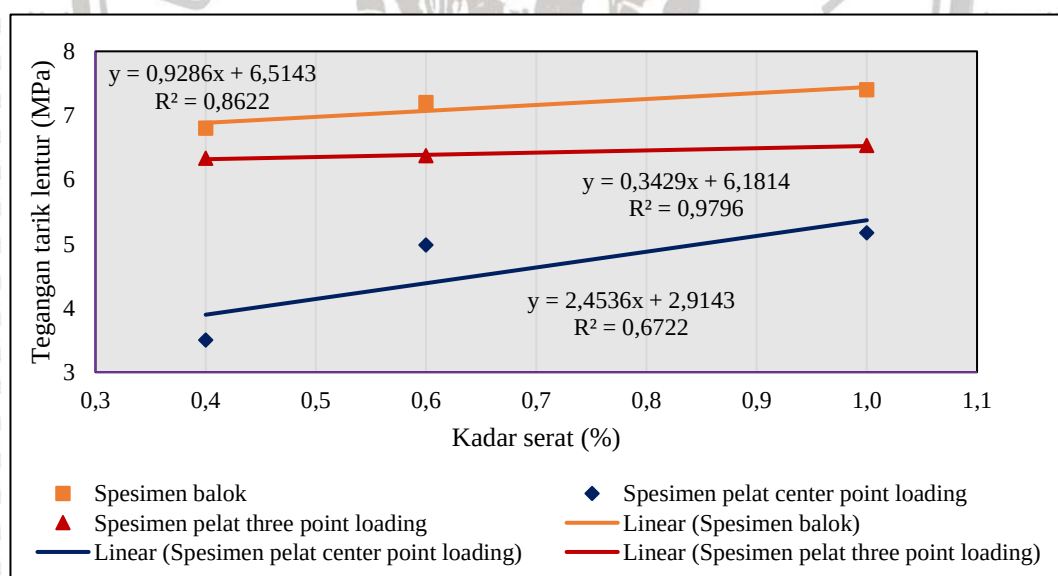
Jika dilihat dari kemiringan setiap garis *trendline*, terlihat bahwa peningkatan nilai kuat lekat jauh lebih besar apabila dibandingkan dengan peningkatan nilai kuat tarik baja, kuat tarik beton, maupun kuat tekan beton. Hal ini disebabkan kuat lekat beton serat kinerja tinggi, sangat dipengaruhi atau berbanding lurus dengan selisih nilai kuat tarik baja pada kedua sisi segmen yang retak dan juga berbanding lurus dengan akar kuat tekan beton. Sehingga penambahan kuat tarik baja dan penambahan kuat tekan beton akan menimbulkan penambahan kuat lekat yang jauh lebih besar. Hasil ini bisa dikonfirmasi dengan Gambar 5.24 yang menunjukkan hubungan kuat tarik belah silinder beton serat kinerja tinggi dengan kadar serat baja serta Gambar 5.27 yang menunjukkan hubungan kuat tarik cabut (*Pullout*) benda uji silinder beton serat kinerja tinggi dengan kadar serat baja. Kedua diagram tersebut

menunjukkan penambahan kadar serat akan meningkatkan nilai kuat tarik belah maupun kuat tarik cabut beton serat kinerja tinggi.

Sementara itu, kuat tarik lentur f_r menunjukkan perilaku yang lebih mendekati perilaku kuat tekan beton. Ini disebabkan nilai kuat lentur hanya berbanding lurus dengan akar kuat tekan beton saja. Jika hasil analisis dan pengujian tersebut dibandingkan dengan hasil pengujian spesimen balok dan spesimen pelat beton serat kinerja tinggi dengan variasi kadar serat baja antara 0,4% hingga 1,0% yang tertuang dalam Tabel 5.71 dan Gambar 5.59, terlihat bahwa penambahan kadar serat baja dari 0,4% hingga 1,0% menunjukkan pengaruh terhadap meningkatnya hasil uji kuat lentur. Hal ini ditunjukkan oleh nilai korelasi R^2 yang mendekati nilai 1.

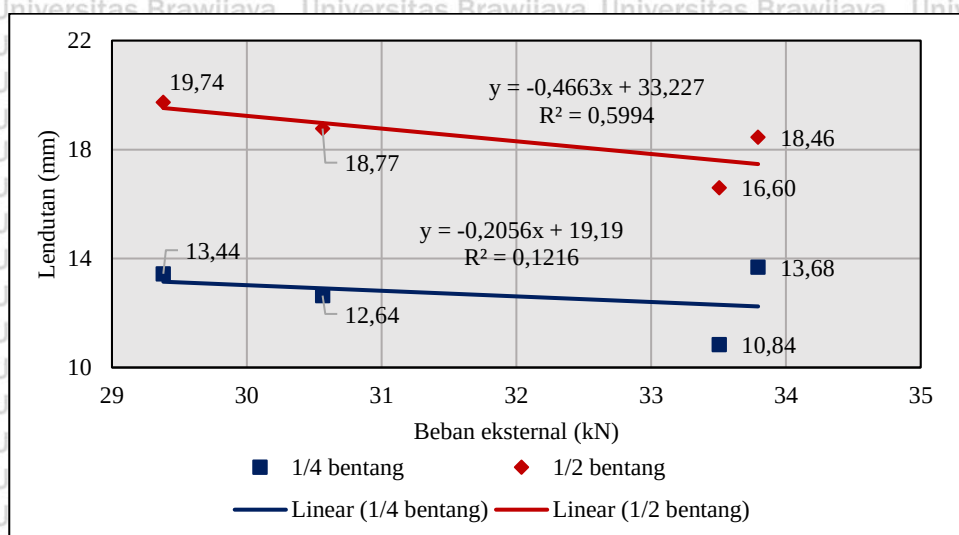
Tabel 5. 71 Hasil Uji Kuat Lentur Spesimen Beton Serat Kinerja Tinggi

Spesimen	Kadar serat %	Center point loading		Three Point Loading
		Balok 15x15x60	Pelat 5x15x60	Pelat 5x15x60
	%	MPa	MPa	MPa
FRC-2	0,4%	6,80	3,50	6,33
FRC-3	0,6%	7,20	4,98	6,37
FRC-4	1,0%	7,40	5,17	6,53



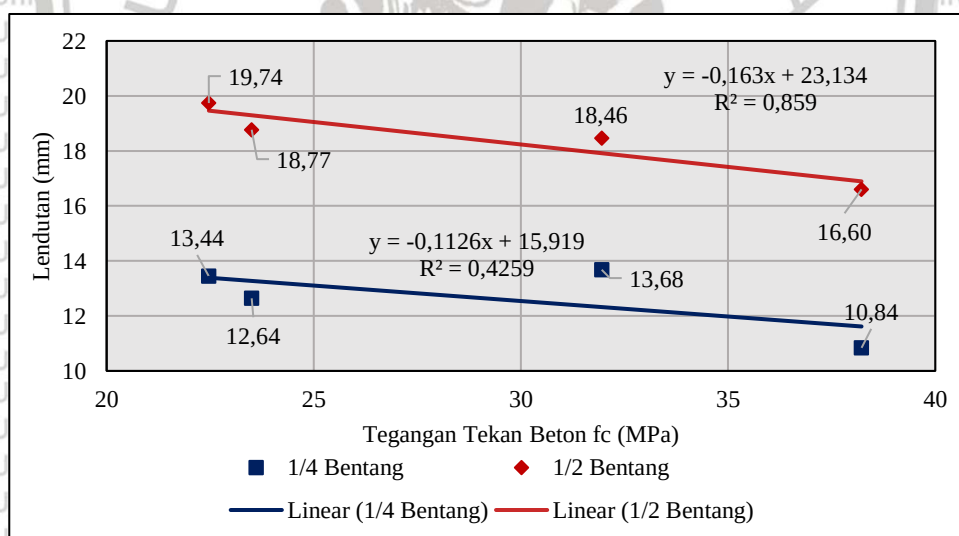
Gambar 5. 59 Hubungan kadar serat dan tegangan tarik lentur spesimen HPFRC

Gambar 5.60 memperlihatkan hubungan antara beban eksternal maksimum yang terjadi pada saat terjadi keruntuhan pelat HPFRC dengan lendutan yang terjadi pada masing-masing pelat. Hasil pengujian menunjukkan bahwa lendutan pada pelat cenderung mengalami penurunan, meskipun beban yang bekerja pada saat terjadi keruntuhan lentur pelat HPFRC meningkat.



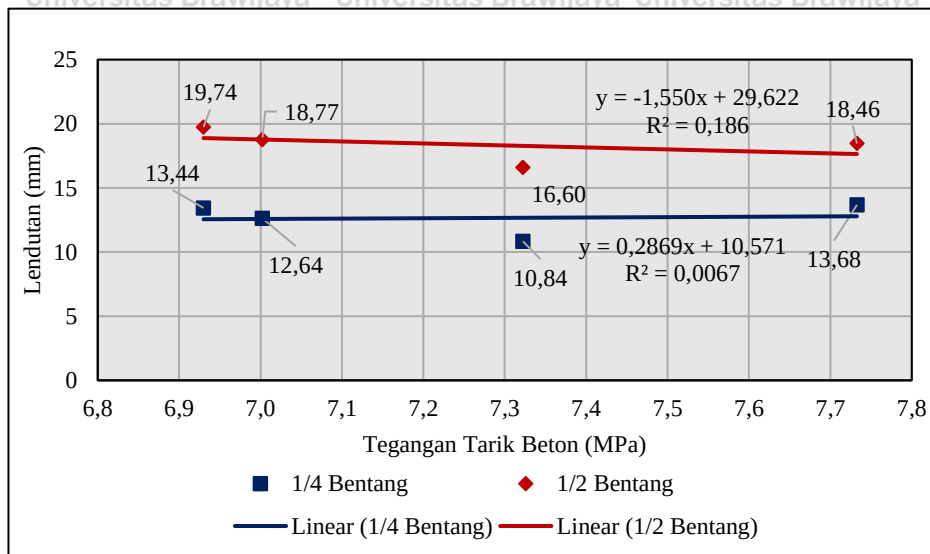
Gambar 5. 60 Hubungan beban eksternal maksimum dan lendutan pelat HPFRC

Hubungan antara nilai tegangan tekan beton dengan lendutan yang terjadi pada saat keruntuhan pelat HPFRC dapat dilihat pada Gambar 5.61. Terlihat bahwa tegangan pada sisi tekan pelat beton serat kinerja tinggi secara keseluruhan belum mencapai kuat tekan betonnya. Namun demikian dengan meningkatnya kapasitas tegangan tekan beton pada saat terjadi keruntuhan, maka lendutan yang terjadi juga menjadi lebih kecil.



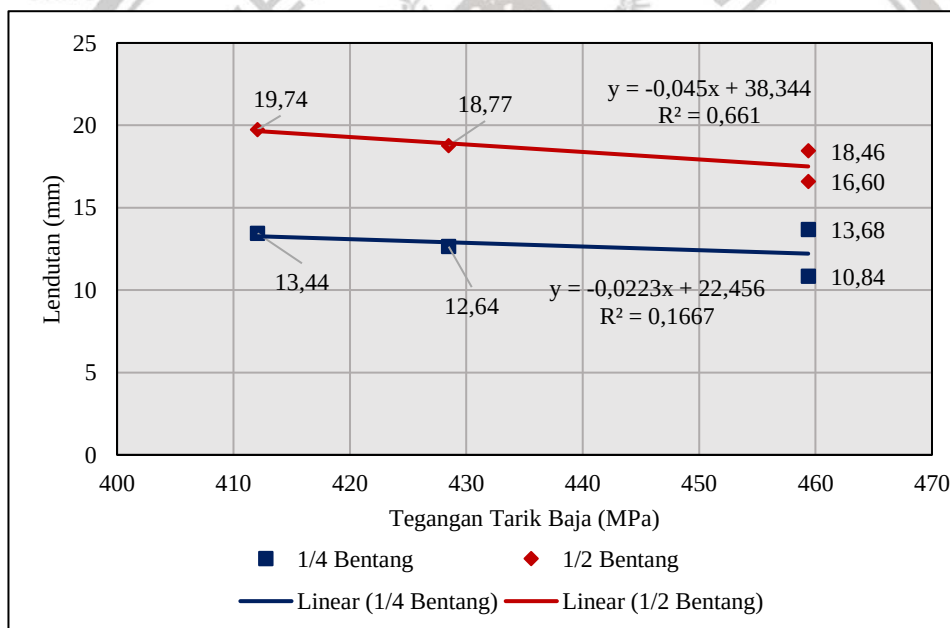
Gambar 5. 61 Hubungan tegangan tekan beton dengan lendutan pelat HPFRC

Hubungan antara tegangan tarik lentur beton dengan lendutan pelat HPFRC dapat dilihat pada Gambar 5.62. Meskipun terlihat adanya kecenderungan meningkatnya kuat tarik beton akan menurunkan besarnya lendutan pelat HPFRC, namun dengan kecilnya nilai korelasi yaitu $R^2 = 0,186$, menunjukkan bahwa tegangan tarik beton tidak cukup signifikan mempengaruhi lendutan pelat.



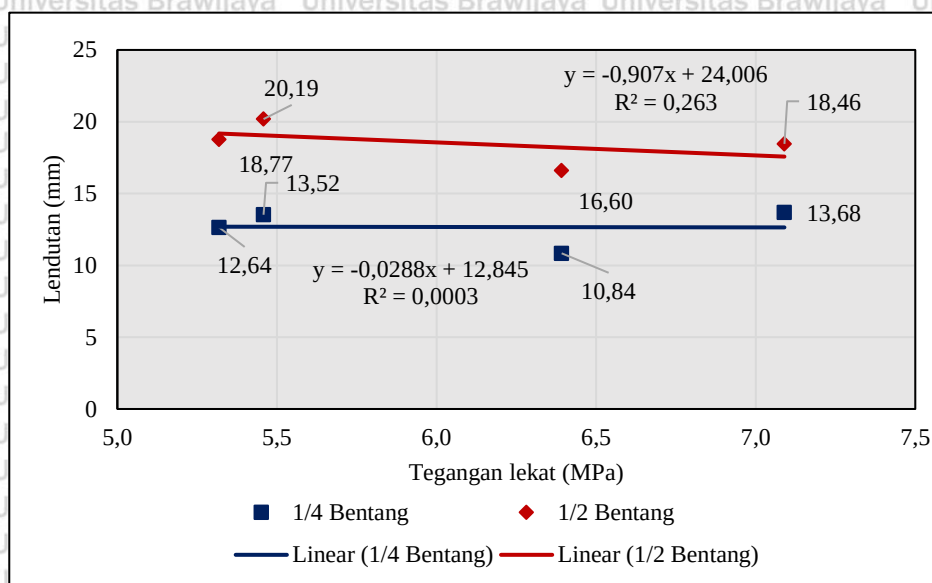
Gambar 5. 62 Hubungan tegangan tarik beton dengan lendutan pelat HPFRC

Hubungan antara tegangan lekat beton dengan lendutan pelat HPFRC terlihat pada Gambar 5.63.



Gambar 5. 63 Hubungan tegangan tarik baja dengan lendutan pelat HPFRC

Dari diagram pada Gambar 5.62 dan Gambar 5.63 tersebut terlihat bahwa kenaikan nilai tegangan tarik baja maupun kenaikan tegangan lekat pada pelat HPFRC akan cenderung mengurangi lendutan di bagian tengah pelat HPFRC. Nilai R^2 untuk hubungan tegangan tarik baja dengan lendutan di tengah pelat bernilai 0,661 dan untuk hubungan tegangan lekat dengan lendutan bernilai 0,263.



Gambar 5. 64 Hubungan tegangan lekat dengan lendutan pelat HPFRC

Gambar 5.64 memperlihatkan hubungan antara tegangan lekat dengan lendutan pelat HPFRC. Terlihat bahwa peningkatan tegangan lekat akan memberikan dampak pada penurunan lendutan yang terjadi. Namun demikian tingkat korelasi R^2 yang didapat masih cukup kecil, yaitu hanya 0,263.

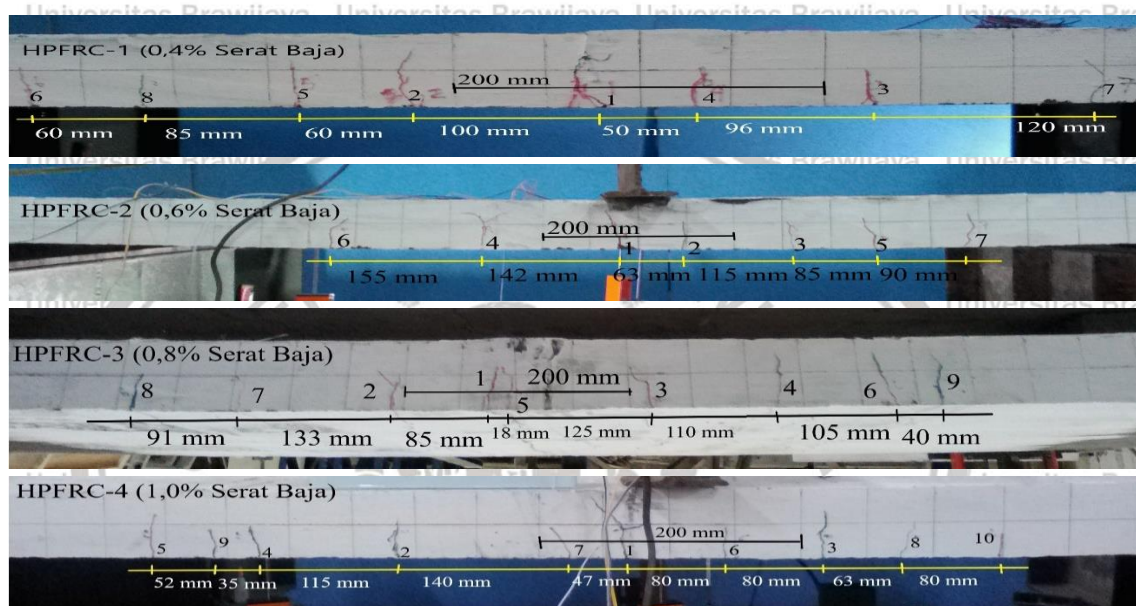
5.8 Perilaku Retak Pelat HPFRC Satu Arah

Retak lentur pada pelat merupakan retakan yang disebabkan oleh beban luar yang bekerja pada pelat. Retak lentur terbentuk di daerah tarik pelat dan memiliki bentuk irisan, dengan lebar retak maksimum terletak pada permukaan tegangan tarik dan lebar retak nol terletak dekat sumbu netral (Piyasena, 2002). Pelat akan mengalami retak pada interval diskrit apabila kuat tarik beton terlampaui. Pada bagian pelat yang retak, semua tegangan tarik akan ditahan oleh tulangan baja. Tegangan tarik akan muncul pada beton di antara retakan, karena sejumlah tegangan tarik akan disalurkan dari baja ke beton oleh tegangan lekat (*bond stress*). Besaran dan distribusi tegangan lekat akan menentukan distribusi tegangan tarik pada beton dan baja di antara retakan. Retak tambahan akan terbentuk di antara retakan awal pada nilai momen yang lebih tinggi apabila kekuatan tarik beton terlampaui. Jarak retak akhir akan dicapai ketika besaran gaya tarik di antara dua retakan tidak dapat lagi disalurkan oleh lekatan baja ke beton (Park & Paulay, 1975).

5.8.1 Pola retak dan panjang segmen retak

Pola retak dan panjang segmen retak yang terjadi pada pengujian lentur pelat dengan variasi kadar serat diperlihatkan pada Gambar 5.65. Pola retak yang terjadi pada pengujian

lentur dengan metode *three-point bending* atau *center-point loading* ini menunjukkan bahwa retakan yang terjadi pada pelat merupakan retak lentur. Retakan pertama seluruhnya terjadi di tengah pelat. Selanjutnya sesuai dengan penomoran yang terlihat pada Gambar 5.65 terjadi perkembangan retak yang juga terjadi akibat meningkatnya tegangan tarik pada sisi bawah garis netral pelat. Pelat HPFRC-1 memiliki jumlah retakan sebanyak 8 retakan sebelum runtuh. Pelat HPFRC-2 memiliki 7 buah retakan sebelum runtuh. Pelat HPFRC-3 memiliki 9 retakan sebelum runtuh. Sedangkan Pelat HPFRC-4 memiliki 10 retakan sebelum runtuh.



Gambar 5.65 Pola retak dan jarak retak lentur pelat HPFRC dengan variasi serat baja

Berdasarkan pola retak yang terlihat, dan dikaitkan dengan proses terjadinya retak lentur, perkembangan segmen retakan sejak retak pertama hingga pelat beton serat kinerja tinggi runtuh untuk masing-masing prosentase kadar serat baja dapat dilihat pada Tabel 5.72 hingga Tabel 5.75.

Tabel 5.72 Perkembangan Segmen Retakan pada Pelat HPFRC-1 (0,4% serat baja)

Kondisi Pelat	Beban (kN)		Panjang segmen (mm)					
Awal	0,000		1600					
Retak 1	11,17		780		820			
Retak 2	12,91	680	100		820			
Retak 3	14,58	680	100	146	674			
Retak 4	15,56	680	100	50	96	674		
Retak 5	16,74	620	60	100	50	96	674	
Retak 6	19,54	475	145	60	100	50	96	674
Retak 7	21,74	475	145	60	100	50	96	120
Retak 8	26,49	475	60	85	60	100	50	96
Runtuh	27,94	475	60	85	60	100	50	96

Tabel 5. 73 Perkembangan Segmen Retakan pada Pelat HPFRC-2 (0,6% serat baja)

Kondisi Pelat	Beban (kN)	Panjang segmen (mm)							
Awal	0,000	1600							
Retak 1	10,41	780		820					
Retak 2	15,86	780	63	757					
Retak 3	16,56	780	63	115	642				
Retak 4	18,31	638	142	63	11	642			
Retak 5	22,64	638	142	63	115	85	557		
Retak 6	24,41	483	155	142	63	115	85	557	
Retak 7	26,17	483	155	142	63	115	85	90	467
Runtuh	29,12	483	155	142	63	115	85	90	467

Tabel 5. 74 Perkembangan Segmen Retakan pada Pelat HPFRC-3 (0,8% serat baja)

Kondisi Pelat	Beban (kN)	Panjang segmen (mm)									
Awal	0,000	1600									
Retak 1	17,31		775					825			
Retak 2	19,78	690		85				825			
Retak 3	20,76	690		85	143			682			
Retak 4	22,72	690		85	143	110		572			
Retak 5	24,44	690		85	18	125	110	572			
Retak 6	25,67	690		85	18	125	110	105	467		
Retak 7	27,63	557	133	85	18	125	110	105	467		
Retak 8	30,57	466	91	133	85	18	125	110	105	467	
Retak 9	31,55	466	91	133	85	18	125	110	105	40	427
Runtuh	32,35	466	91	133	85	18	125	110	105	40	427

Tabel 5. 75 Perkembangan Segmen Retakan pada Pelat HPFRC-4 (1,0% serat baja)

Kondisi Pelat	Beban (kN)	Panjang segmen (mm)									
Awal	0,000	1600									
Retak 1	18,06		770					830			
Retak 2	20,76		583		187			830			
Retak 3	21,25		583		187			160	670		
Retak 4	23,71	468		115	187			160	670		
Retak 5	25,41	381	87	115	187			160	670		
Retak 6	26,65	381	87	115	187	80	80		670		
Retak 7	28,61	381	87	115	140	47	80	80	670		
Retak 8	30,02	381	87	115	140	47	80	80	63	607	
Retak 9	31,51	381	52	35	115	140	47	80	80	63	607
Retak 10	31,68	381	52	35	115	140	47	80	80	63	80
Runtuh	32,04	381	52	35	115	140	47	80	80	63	80

Momen yang terjadi di tengah bentang sesuai dengan beban luar yang ditahan saat terjadinya retakan pada pengujian masing-masing pelat HPFRC dihitung menggunakan persamaan $M = \frac{1}{4} PL + \frac{1}{8} q L^2$, dengan ukuran bentang pelat $L = 1,6$ m. Besaran beban dan momen yang bekerja di tengah bentang pelat untuk masing-masing kadar serat baja dapat

dilihat pada tabel 5.76. Nilai momen pada saat pelat runtuh menjadi pembatas dalam menganalisis gaya dalam masing-masing pelat.

Tabel 5. 76 Rekapitulasi Beban dan Momen di Tengah Bentang Pelat HPFRC

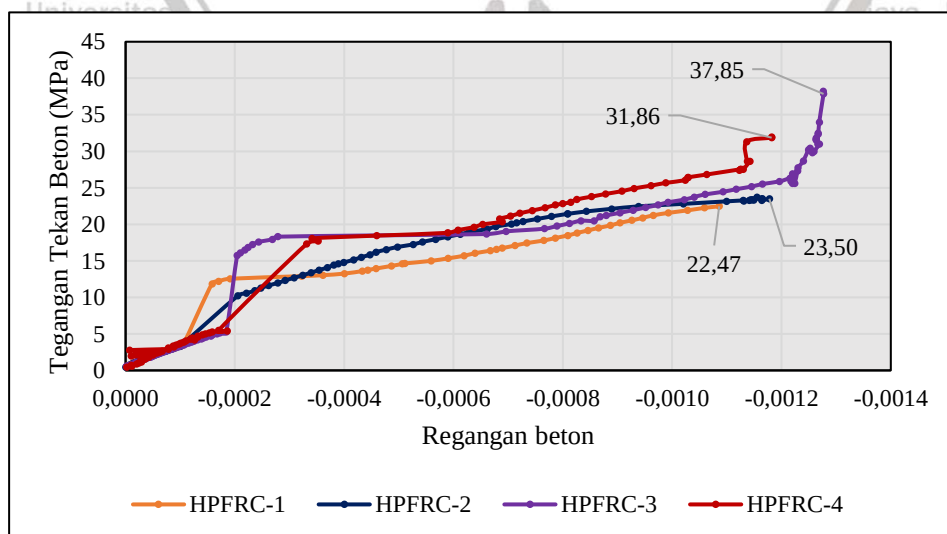
	HPFRC-1		HPFRC-2		HPFRC-3		HPFRC-4	
Pelat	(0,4% Serat Baja)		(0,6% Serat Baja)		(0,8% Serat Baja)		(1,0% Serat Baja)	
	Beban	Momen	Beban	Momen	Beban	Momen	Beban	Momen
	kN	kN-m	kN	kN-m	kN	kN-m	kN	kN-m
Retak 1	11,17	5,04	10,41	4,74	17,31	7,50	18,06	7,81
Retak 2	12,91	5,74	15,86	6,92	19,78	8,49	20,76	8,89
Retak 3	14,58	6,41	16,56	7,20	20,76	8,88	21,25	9,09
Retak 4	15,56	6,80	18,31	7,90	22,72	9,67	23,71	10,07
Retak 5	16,74	7,27	22,64	9,63	24,44	10,35	25,41	10,75
Retak 6	19,54	8,39	24,41	10,34	25,67	10,85	26,65	11,24
Retak 7	21,74	9,27	26,17	11,04	27,63	11,63	28,61	12,03
Retak 8	26,49	11,17			30,57	12,81	30,02	12,59
Retak 9					31,55	13,20	31,51	13,19
Retak 10							31,68	13,26
Runtuh	27,94	11,75	29,12	12,23	32,35	13,52	32,04	13,40

Catatan: Berat sendiri pelat = 1,80 kN/m' dan profil perata beban = 16,5 kg

5.8.2 Tegangan-regangan pelat beton serat kinerja tinggi

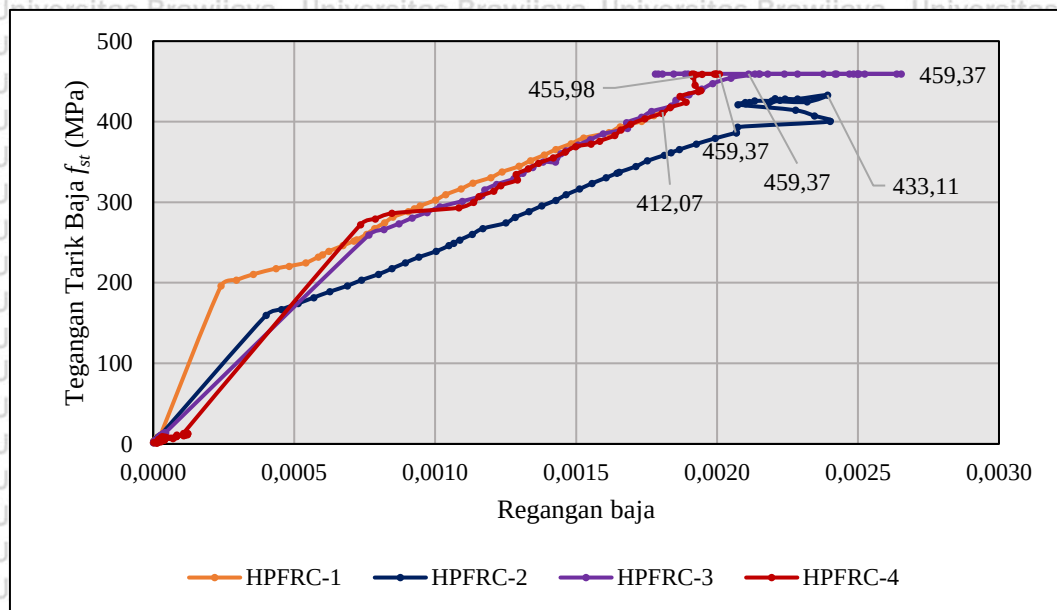
Tegangan tarik baja tulangan pelat HPFRC dihitung pada level tulangan beton, yaitu 2 cm di atas dasar pelat. Tegangan tekan pelat HPFRC dihitung pada sisi atas pelat HPFRC.

Data regangan diperoleh dari hasil pembacaan *strain gauge* baja yang dipasang pada sisi bawah tulangan baja dan *strain gauge* beton pada sisi atas pelat beton. Hubungan tegangan-regangan tekan beton pada Gambar 5.66 menunjukkan perilaku elastis linier. Sebagai pembandingan dapat dilihat pada Gambar 5.49.



Gambar 5. 66 Hubungan tegangan-regangan tekan beton serat kinerja tinggi

Diagram tegangan regangan pada baja tarik dapat dilihat pada Gambar 5.67. Terlihat adanya loncatan besar tegangan pada baja setelah retak pertama. Namun perilaku hubungan tegangan regangan ini terlihat berperilaku linier untuk pelat HPFRC-1 dan HPFRC-2 serta bi-linier untuk pelat HPFRC-3 dan HPFRC-4. Hasil ini dapat dibandingkan dengan Gambar 5.50 yang disusun murni dari analisis gaya dalam sesuai dengan pembacaan data pembebanan.



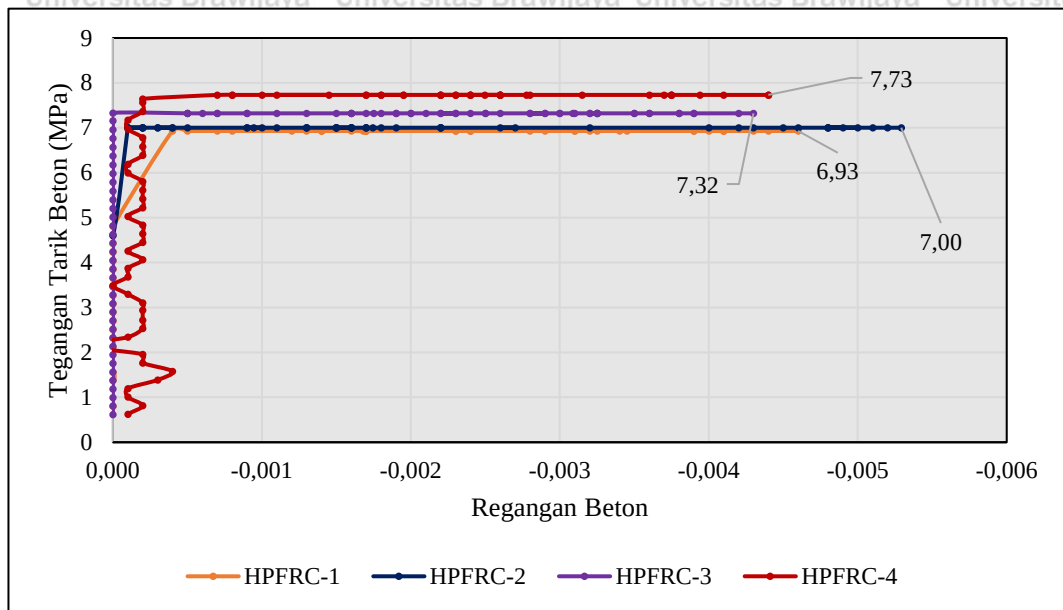
Gambar 5. 67 Hubungan tegangan-regangan tarik baja tulangan pelat HPFRC

Hubungan tegangan-regangan tarik beton pada level tulangan diperoleh dengan cara mengukur deformasi horisontal menggunakan LVDT yang dipasang di sisi pelat sebagaimana terlihat pada Gambar 5.68. Deformasi yang diperiksa adalah sepanjang 200 mm di tengah pelat dengan ketinggian 20 mm dari dasar pelat.



Gambar 5. 68 Pengukuran deformasi horisontal menggunakan LVDT

Deformasi horisontal dibaca bersamaan dengan penambahan beban hingga pelat mengalami kegagalan lentur. Nilai deformasi yang terjadi dibagi dengan panjang 200 mm (jarak penempelan pengikat LVDT dan penumpu ujung LVDT pada pelat) dan dihitung sebagai regangan tarik pada sisi bawah beton di level tulangan. Perkembangan tegangan dan regangan tarik beton pada level tulangan bisa dilihat pada Gambar 5.69.

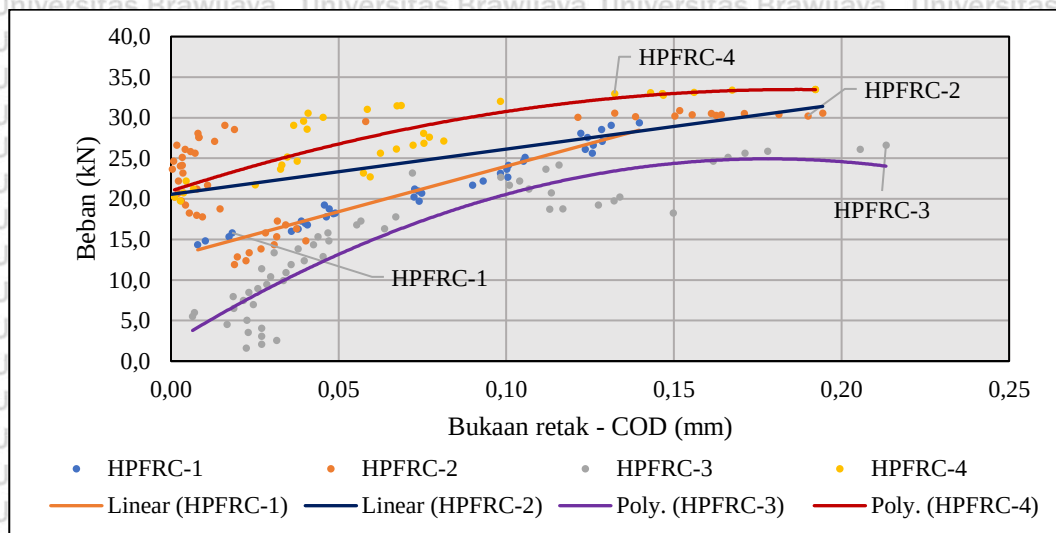


Gambar 5. 69 Hubungan tegangan-regangan tarik beton pada uji lentur pelat HPFRC

5.8.3 Lebar retak berdasar hasil uji pelat HPFRC satu arah

Definisi lebar retak adalah perbedaan perpanjangan baja dan beton pada jarak 2 kali panjang transmisi ($2 l_t$) yang diperlukan untuk meningkatkan kekuatan beton dari nol hingga mencapai kuat tarik beton f_{ctm} . (Eurocode 2, 2014). Apabila pelat telah diberi pembebanan dan pada saat runtuh terdapat beberapa retakan, maka 2 kali panjang transmisi tersebut dapat diartikan sebagai jarak antara 2 retakan terdekat. Pada penelitian ini diketahui bahwa panjang segmen di tengah bentang pelat antara dua retakan ($2 l_t$) adalah sebesar 50 mm untuk pelat HPFRC-1, selanjutnya untuk pelat HPFRC-2 adalah 63 mm, pelat HPFRC-3 sebesar 85 mm, dan pelat HPFRC-4 sebesar 80 mm. Oleh karena itu lebar retak pada level tulangan bisa diperoleh dari pembacaan data tegangan-regangan baja tulangan pada Gambar 5.67 dan data tegangan-regangan beton tarik pada Gambar 5.69. Gambar 5.69 diperoleh dari pembacaan deformasi pada alat LVDT yang dipasang pada sisi pelat beton seperti pada Gambar 5.68.

Hubungan antara beban dan lebar retak sejak terjadinya retak pertama hingga runtuh dapat digambarkan sebagaimana terlihat pada Gambar 5.70.



Gambar 5. 70 Hubungan antara beban dan bukaan retak pelat HPFRC

Hubungan antara beban dan lebar retak untuk Pelat HPFRC-1 dan HPFRC-2 merupakan hubungan elastis disebabkan pelat telah mengalami keruntuhan sebelum terjadinya leleh pada tulangan baja. Oleh karena itu bukaan retak (*Crack Opening Displacement*) pada kedua pelat ini akan proporsional dengan lebar retak, dan hubungannya dapat digambarkan sebagai hubungan linier. Untuk pelat HPFRC-3 dan pelat HPFRC-4, sesudah tulangan baja mengalami leleh, maka terjadi deformasi plastis sebelum pelat runtuh. Dengan demikian hubungan beban dan bukaan retak setelah terjadinya plastisitas akan menjadi hubungan non linier. Nilai bukaan retak maksimum pada hasil pengujian ini akan menjadi koefisien perbandingan dengan nilai COD untuk menghitung persamaan lebar retak pada analisis menggunakan metode LEFM. Hal ini sesuai dengan penjelasan David Broek bahwa pada kasus deformasi elastis maupun deformasi plastis COD proporsional dengan lebar retak dan ditulis dengan persamaan $COD = C_1 \frac{P}{E} a$ untuk kasus deformasi elastis atau $COD = C_1 \frac{P}{E} (a + r_p^*)$ untuk kasus deformasi plastis (Broek, 1982).

Pada saat terjadi kegagalan pelat menahan beban atau pada saat terjadi keruntuhan pelat pada uji lentur pelat HPFRC di laboratorium, lebar retak adalah sebagaimana terlihat pada Tabel 5.77.

Tabel 5. 77 Perhitungan Lebar Retak Maksimum Pada Level Tulangan Berdasar Hasil Eksperimen

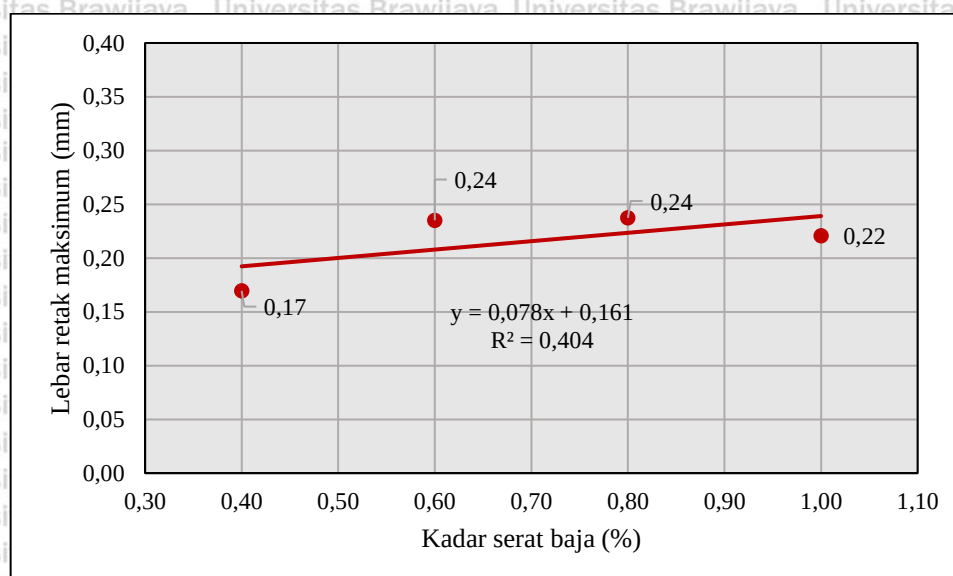
Uraian		Beban <i>P</i>	Regangan baja	Regangan Beton	Elongation baja	Elongation beton	Lebar retak
Pelat	Kondisi	kN			mm	mm	mm
HPFRC-1 (0,4%)	Retak I	14.352	0.0002	0.0004	0.012	0.020	0.008
	Runtuh	29.381	0.0018	0.0046	0.090	0.230	0.140
HPFRC-2 (0,6%)	Retak I	11.904	0.0004	0.0001	0.025	0.006	0.019
	Runtuh	30.563	0.0022	0.0053	0.139	0.333	0.194
HPFRC-3 (0,8%)	Retak I	18.775	0.0008	0.0005	0.065	0.043	0.022
	Leleh	32.891	0.0022	0.0029	0.183	0.247	0.064
	Runtuh	33.794	0.0018	0.0043	0.152	0.366	0.213
HPFRC-4 (1,0%)	Retak I	19.771	0.0007	0.0007	0.059	0.056	0.003
	Leleh	33.103	0.0019	0.0037	0.153	0.296	0.143
	Runtuh	33.505	0.0020	0.0044	0.160	0.352	0.192

Selanjutnya untuk menghitung lebar retak maksimum pada permukaan pelat, dapat digunakan perbandingan segitiga mempergunakan nilai perbandingan kedalaman retak relatif dan selimut beton ($a/(a-d_c)$) pada setiap kondisi retakan. Dengan demikian lebar retak maksimum dapat ditentukan seperti terlihat pada Tabel 5.78.

Tabel 5. 78 Lebar Retak Maksimum Pelat HPFRC

PELAT	Kondisi	Beban <i>P</i>	Kedalaman retak relatif a/h	Lebar retak maksimum	
				level tulangan	Level permukaan
		kN		mm	mm
HPFRC-1 (0,4%)	Retak I	14.352	0.779	0.008	0.010
	Runtuh	29.381	0.824	0.140	0.170
HPFRC-2 (0,6%)	Retak I	11.904	0.759	0.019	0.025
	Runtuh	30.563	0.827	0.194	0.235
HPFRC-3 (0,8%)	Retak I	18.775	0.810	0.022	0.028
	Leleh	32.891	0.838	0.064	0.076
	Runtuh	33.794	0.898	0.213	0.237
HPFRC-4 (1,0%)	Retak I	19.771	0.822	0.003	0.003
	Leleh	33.103	0.852	0.143	0.168
	Runtuh	33.505	0.871	0.192	0.221

Hubungan antara kadar serat baja yang digunakan dengan perkembangan lebar retak maksimum pada saat terjadinya keruntuhan pelat ditampilkan pada Gambar 5.71.



Gambar 5. 71 Pengaruh kadar serat terhadap lebar retak maksimum hasil uji lentur pelat HPFRC

Berbeda dengan perilaku lendutan yang terjadi, dari gambar 5.71 terlihat bahwa penambahan kadar serat ternyata juga meningkatkan lebar retak. Hal ini disebabkan meningkatnya beban yang bekerja pada saat terjadi keruntuhan pelat HPFRC. Oleh karena itu patut diduga bahwa penambahan kadar serat akan meningkatkan kemampuan menahan beban layan sehingga lebar retak pada pelat HPFRC juga meningkat secara proporsional.

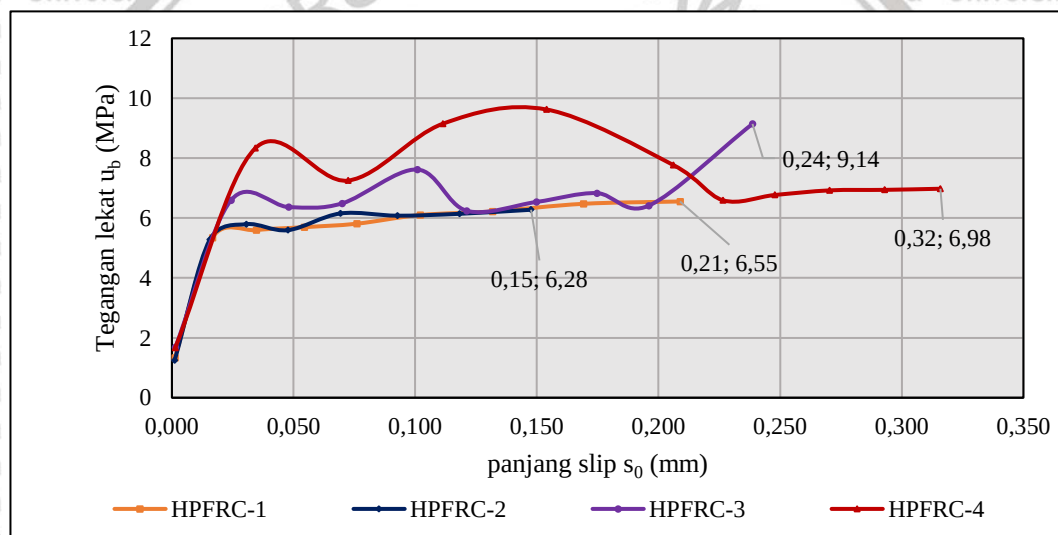
5.8.4 Lebar retak berdasar tegangan lekat (*bond stress*) dan panjang slip (*bond slip*)

Perkembangan tegangan lekat dan nilai kumulatif panjang *slip* masing-masing pelat HPFRC sejak retakan pertama hingga pelat mengalami kegagalan menahan beban atau pelat runtuh dapat dilihat pada Tabel 5.79. Terlihat bahwa pelat HPFRC-1 dengan 8 celah retakan memiliki rata-rata tegangan lekat (*bond stress*) sebesar 5,458 MPa dengan total panjang *slip* s_0 sebesar 0,209 mm. Pelat HPFRC-2 dengan 7 celah retakan memiliki rata-rata tegangan lekat (*bond-stress*) sebesar 5,319 MPa dan total panjang *slip* s_0 sebesar 0,148 mm. Pelat HPFRC-3 dengan 9 celah retakan memiliki nilai rata-rata tegangan lekat (*bond-stress*) sebesar 6,392 MPa dan total panjang *slip* s_0 sebesar 0,239 mm. Dan akhirnya Pelat HPFRC-4 dengan 10 celah retakan memiliki nilai rata-rata tegangan lekat (*bond stress*) 7,090 serta total panjang *slip* s_0 sebesar 0,316 mm.

Tabel 5. 79 Tegangan Lekat dan Kumulatif Panjang Slip Pelat HPFRC

Kondisi Pelat	HPFRC-1		HPFRC-2		HPFRC-3		HPFRC-4	
	u_b	s_o	u_b	s_o	u_b	s_o	u_b	s_o
	MPa	mm	MPa	mm	MPa	mm	MPa	mm
Retak 1	1.332	0.001	1.243	0.001	1.688	0.001	1.662	0.001
Retak 2	5.343	0.017	5.276	0.016	6.587	0.024	8.332	0.034
Retak 3	5.596	0.035	5.794	0.031	6.365	0.048	7.250	0.072
Retak 4	5.695	0.054	5.595	0.048	6.489	0.070	9.151	0.111
Retak 5	5.810	0.076	6.152	0.069	7.620	0.101	9.624	0.154
Retak 6	6.101	0.102	6.077	0.093	6.243	0.121	7.770	0.206
Retak 7	6.220	0.132	6.140	0.118	6.537	0.150	6.594	0.226
Retak 8	6.475	0.169			6.832	0.175	6.769	0.248
Retak 9					6.413	0.196	6.923	0.270
Retak 10							6.940	0.293
Runtuh	6.553	0.209	6.276	0.148	9.143	0.239	6.978	0.316
Rata-rata	5.458	0.209	5.319	0.148	6.392	0.239	7.090	0.316

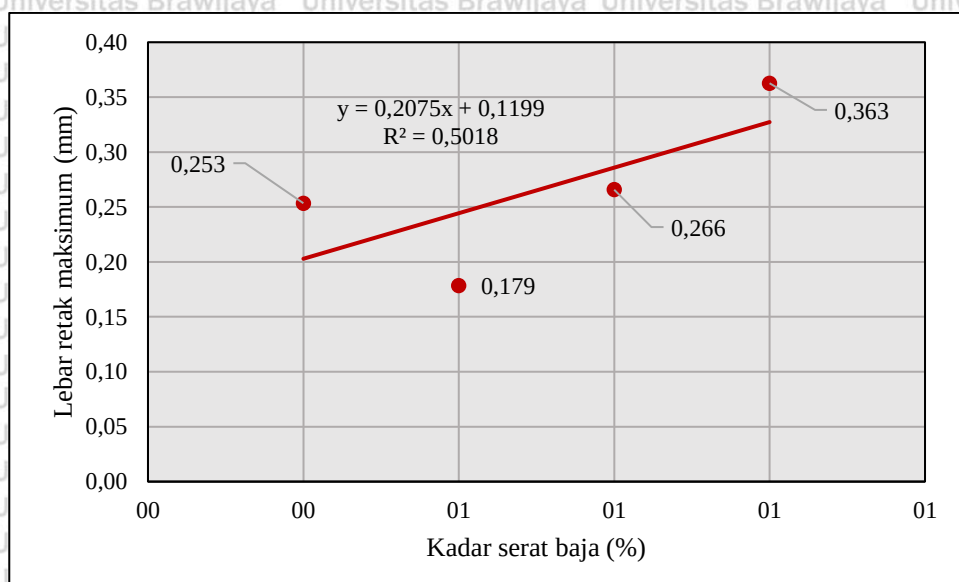
Hubungan antara tegangan lekat (*bond-stress*) dan kumulatif panjang slip (*bond-slip*) atau lebar retak pelat pada level tulangan dapat dilihat pada Gambar 5.72.

Gambar 5. 72 Hubungan tegangan lekat dan kumulatif panjang slip s_o pelat HPFRC

Tabel 5. 80 Lebar Retak Maksimum Pelat HPFRC Berdasar Analisis Tegangan Lekat

PELAT	Tegangan Lekat u_b Rata-rata	Kedalaman retak relatif a/h	Lebar retak	
			level tulangan	Level permukaan
	MPa	-	mm	mm
HPFRC-1 (0,4%)	5.458	0.824	0.209	0.253
HPFRC-2 (0,6%)	5.319	0.827	0.148	0.179
HPFRC-3 (0,8%)	6.392	0.898	0.239	0.266
HPFRC-4 (1,0%)	7.090	0.871	0.316	0.363

Tabel 5.80 memperlihatkan nilai-nilai lebar retak pada level tulangan dan lebar retak maksimum yang terjadi pada saat pelat HPFRC mengalami keruntuhan. Di samping nilai lebar retak, ditampilkan pula besaran tegangan lekat rata-rata dan kedalaman retak relatif pada saat terjadi keruntuhan. Selanjutnya pada Gambar 5.73 ditampilkan pengaruh penambahan kadar serat terhadap lebar retak maksimum sebagai hasil analisis tegangan lekat pelat HPFRC.



Gambar 5. 73 Pengaruh kadar serat terhadap lebar retak maksimum hasil analisis tegangan lekat pelat HPFRC

Persamaan dari garis kecenderungan yang ditampilkan $y = 0,2075x + 0,1199$ dengan nilai $R^2 = 0,5018$ menunjukkan bahwa penambahan kadar serat juga diikuti dengan meningkatnya lebar retak pada saat pelat HPFRC mengalami keruntuhan. Jika gambar ini dikaitkan dengan hubungan antara penambahan serat dengan besar lendutan pelat yang justru menurun, hal ini menjelaskan bahwa penambahan kadar serat memang mampu mengurangi lendutan yang terjadi, namun lebar retak pelat HPFRC justru meningkat sejalan dengan meningkatnya beban yang dapat ditahan.

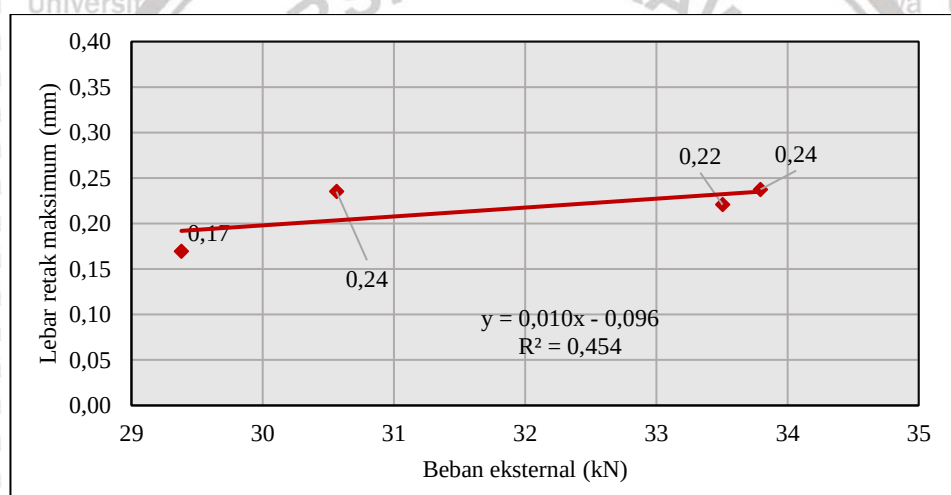
5.8.5 Korelasi sifat mekanik dan lebar retak pelat HPFRC satu arah

Analisis terhadap korelasi sifat mekanik dan lebar retak pelat HPFRC satu arah ditujukan untuk melihat bagaimana pengaruh perkembangan sifat mekanik pelat HPFRC terhadap lebar retak yang terjadi. Pada Tabel 5.81 ditampilkan data beban, sifat mekanik pelat dan lebar retak yang diperoleh dari hasil pengujian lentur pelat HPFRC.

Tabel 5. 81 Sifat Mekanik dan Lebar Retak Pelat HPFRC

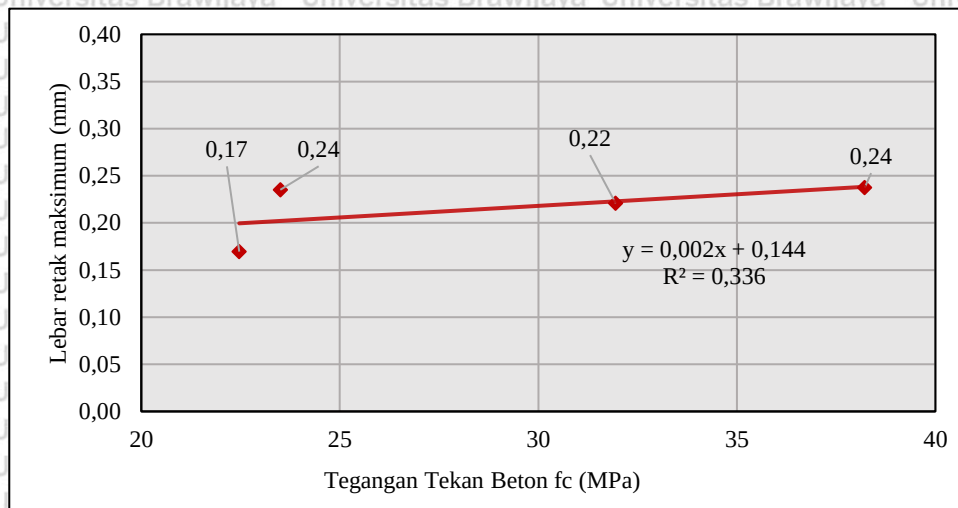
Pelat	Beban P kN	Sifat mekanik pelat HPFRC				Lebar retak	
		f_c' MPa	f_r MPa	u_b Mpa	f_s MPa	w_{tul}	w_{maks} mm
HPFRC-1 (0,4%)	29,381	54,35	6,93	5,73	412,07	0,140	0,170
HPFRC-2 (0,6%)	30,563	55,49	7,00	5,60	428,49	0,194	0,235
HPFRC-3 (0,8%)	33,794	60,68	7,32	6,66	459,37	0,213	0,237
HPFRC-4 (1,0%)	33,505	67,67	7,73	7,40	459,37	0,192	0,221

Hubungan antara beban yang terjadi pada saat terjadi keruntuhan pelat dengan lebar retak yang terjadi pada pelat dapat dilihat pada Gambar 5.74. Terlihat bahwa secara umum dengan bertambahnya beban yang dapat ditahan oleh pelat dengan dimensi (panjang x lebar x tebal) yang sama, maka akan bertambah pula lebar retak yang terjadi. Hal ini berarti dapat dikatakan bahwa kemampuan pelat untuk menambah beban yang dapat ditahan bersifat proporsional dengan peningkatan lebar retak yang terjadi.



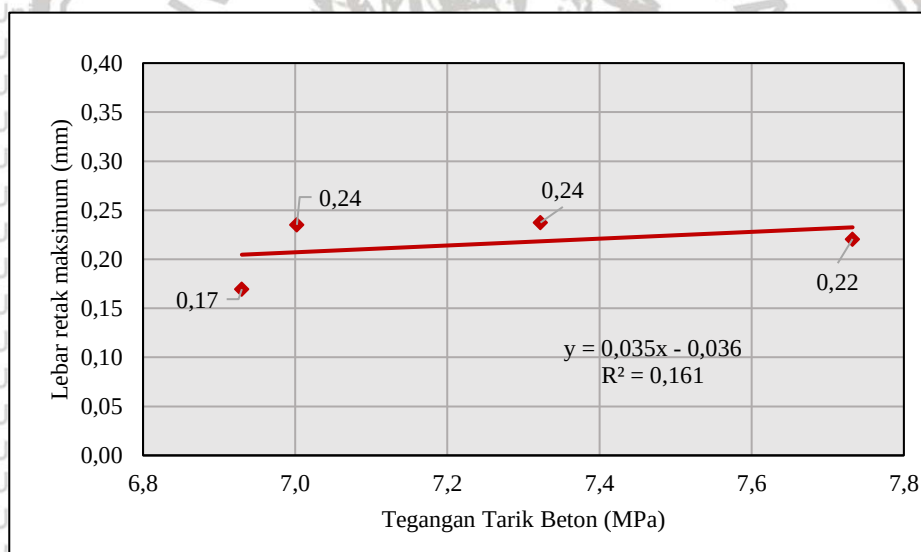
Gambar 5. 74 Hubungan antara beban dengan lebar retak maksimum pelat HPFRC pada saat runtuh

Sejalan dengan meningkatnya beban yang menyebabkan meningkatnya pula nilai kuat tekan lentur yang terjadi pada pelat, maka pada Gambar 5.75 diperlihatkan hubungan antara kuat tekan pada sisi atas pelat HPFRC dengan lebar retak yang terjadi. Dalam hal ini terlihat pula bahwa peningkatan kuat tekan beton yang terjadi pada pelat HPFRC di atas garis netralnya diikuti pula dengan peningkatan lebar retak pelat dengan dimensi yang sama.



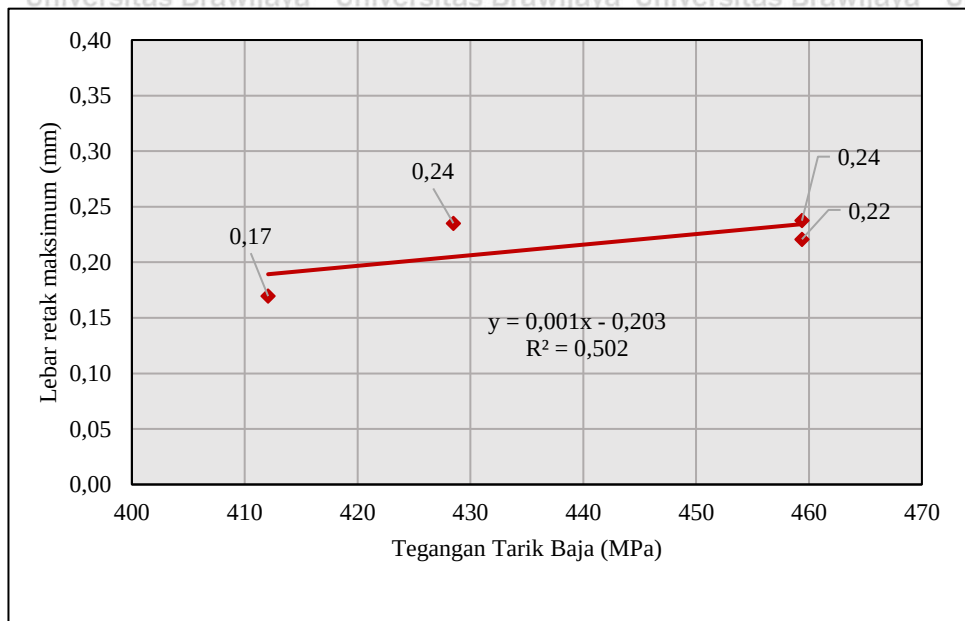
Gambar 5. 75 Hubungan antara tegangan tekan beton dengan lebar retak pelat HPFRC

Gambar 5.76 menunjukkan hubungan antara tegangan tarik lentur beton dengan lebar retak. Dengan persamaan $y = 0.0035x - 0.036$ dan nilai korelasi $R^2 = 0.161$, menunjukkan bahwa peningkatan tegangan tarik beton tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perubahan lebar retak pelat HPFRC.



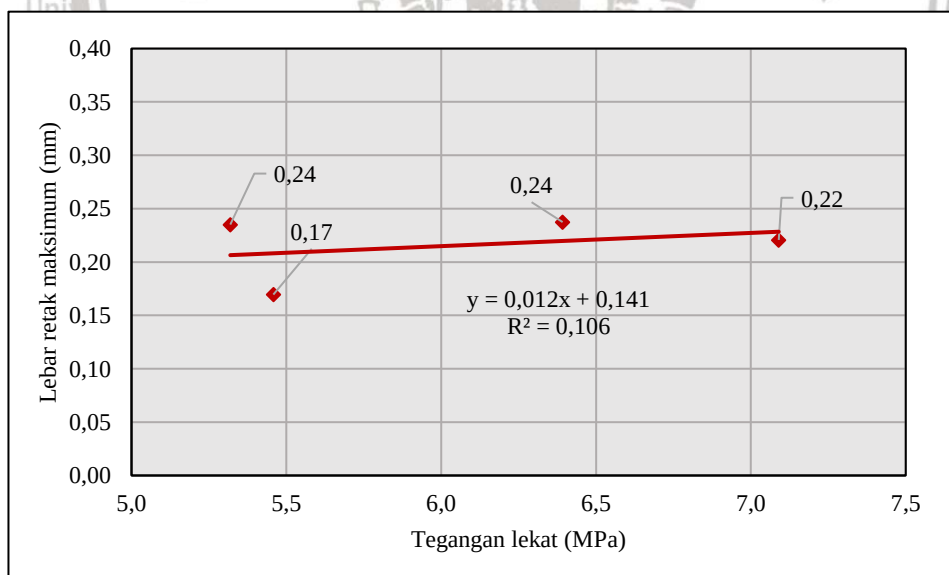
Gambar 5. 76 Hubungan antara tegangan tarik beton dengan lebar retak pelat HPFRC

Gambar 5.77 menunjukkan hubungan antara tegangan tarik baja dengan lebar retak. Dari garis trendline yang memunculkan persamaan $y = 0.001x - 0.203$ dan $R^2 = 0.502$ terlihat bahwa peningkatan tegangan tarik baja yang terjadi sangat proporsional dengan penambahan lebar retak yang terjadi.



Gambar 5. 77 Hubungan antara tegangan tarik baja dengan lebar retak pelat HPFRC

Gambar 5.78 ditampilkan hubungan antara tegangan lekat dengan lebar retak pelat HPFRC. Persamaan $y = 0,012x + 0,141$ dengan nilai $R^2 = 0,106$ menunjukkan kurang adanya pengaruh tegangan lekat terhadap perkembangan lebar retak pelat HPFRC.



Gambar 5. 78 Hubungan antara tegangan lekat dengan lebar retak pelat HPFRC

Dari kesemua hubungan antara sifat mekanik pelat HPFRC dengan lebar retak yang telah ditunjukkan pada Gambar 5.75 hingga 5.78 dapat dikatakan bahwa peningkatan besaran atau nilai kekuatan tarik beton, kuat tekan beton, kuat tarik baja dan kuat lekat beton akan meningkatkan kemampuan pelat untuk menahan beban yang jauh lebih besar, namun

lebar retak yang terjadi pada elemen struktur akan bersifat proporsional sesuai dengan perkembangan beban yang dapat ditahan.

Selanjutnya sesuai dengan penelitian Shionaga, diketahui bahwa penambahan serat baja meningkatkan tensi pengaku regangan serta beban aksial saat tulangan mulai leleh. Hal ini terlihat pada bentuk retakan lebih halus, jarak retakan lebih kecil, dan berkurangnya lebar retak rata-rata. Arah orientasi serat, sesuai variasi arah aliran saat pencetakan, mempengaruhi respon tarik dan lentur dari HPFRC. Arah serat sejajar gaya yang bekerja menyebabkan penurunan defleksi elemen (Shionaga, Walraven, Uijl, & Sato, 2006). Serat baja lebih efisien dalam peningkatan ketangguhan beton kekuatan tinggi dibandingkan serat *polyethylene (PE)*. Meningkatkan kandungan serat dan kombinasi dari serat baja dan *polyethylene (PE)* akan semakin meningkatkan ketangguhan beton serat kinerja tinggi. Ketangguhan beton berdasarkan luasan di bawah diagram penuh tegangan regangan meningkat dengan laju regangan. Untuk beton mutu tinggi dengan penguatan serat, ketangguhan berada dalam urutan menurun dari Steel Fiber HSC > Polyethylene HSC pada tingkat regangan yang diberikan (Wang, Zhang, & Quek, 2012).

5.9 Prediksi Lebar Retak Pelat HPFRC dalam *Linear Elastic Fracture Mechanics* (LEFM)

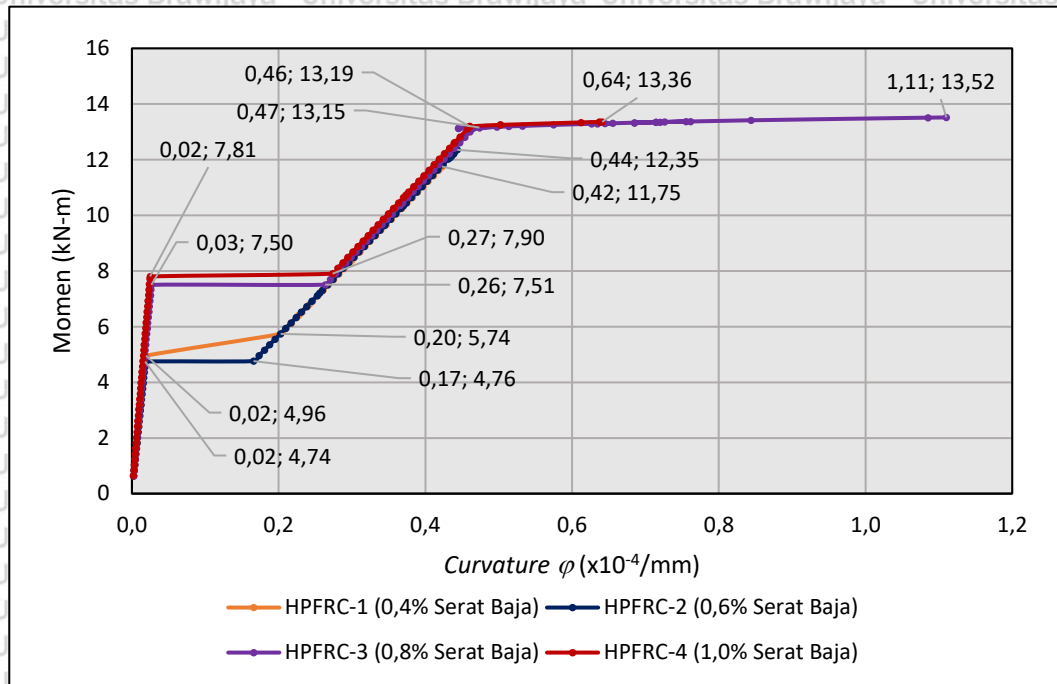
Dengan mengamati hubungan antara variasi kadar serat baja dengan lendutan dan lebar retak, diketahui bahwa penambahan kadar serat mampu mengurangi lendutan pada pelat HPFRC, namun tidak terlihat pengaruhnya terhadap lebar retak, maka dipandang penting untuk mengkaji lebih jauh tentang bagaimana memprediksi lebar retak pada pelat HPFRC satu arah yang diberi pembebanan secara monotonik sebagaimana hasil pengujian lentur pada penelitian ini. Terdapat beberapa metode untuk memprediksi lebar retak maksimum yang terjadi pada balok atau pelat satu arah. Di antaranya melalui pemanfaatan persamaan-persamaan empiris yang umumnya terdapat pada peraturan beton, baik yang berlaku di Amerika, Eropa maupun Australia. Di samping itu dapat pula dilakukan analisis dengan mengikuti kaidah dalam ilmu mekanika retakan. Pada penelitian ini, akan dicoba untuk memprediksi lebar retak dengan mengikuti metode mekanika retakan elastik linier atau *Linear Elastic Fracture Mechanics* (LEFM). Di samping itu juga dicoba menerapkan persamaan-persamaan yang terdapat di dalam ACI 318-14 dan ACI 224.2R-92 yang berlaku di Amerika Serikat, Eurocode 2-2014 yang berlaku di wilayah Eropa, maupun Australian Standard AS-3600-2000 yang berlaku di wilayah Australia. Selanjutnya persamaan lebar

retak yang didapat dari analisis dengan metode LEFM tersebut akan divalidasi dengan menerapkan persamaan tersebut pada benda uji pelat yang terdapat pada naskah jurnal yang telah dipublikasikan.

Dalam penerapan mekanika retakan pada pelat beton serat kinerja tinggi ini, dilakukan beberapa tahap analisis. Tahapan analisis yang dilakukan meliputi: 1) Menyusun diagram kuat sisa P_{res} atau σ_{res} dari hasil analisis gaya dalam sebagai dasar proses analisis mekanika retakan; 2) Menghitung faktor konsentrasi tegangan k_t ; 3) Menentukan tegangan lentur maksimum akibat beban total σ_{ys} ; 4) Menghitung besaran daerah plastis ujung retakan r_p^* ; 5) Menghitung faktor intensitas tegangan (K_I) dan ketangguhan fraktur (*Fracture Toughness*) K_{IC} berdasar hasil analisis gaya dalam; 6) Menghitung tingkat pelepasan energi elastis G_I dan ketahanan fraktur R ; 7) Menyusun persamaan faktor intensitas tegangan K_I dan faktor geometri $f(\xi)$ atau $f(a/h)$ sebagai fungsi kedalaman retak relatif $\xi = a/h$ pada pelat beton serat kinerja tinggi. Persamaan disusun sesuai dengan konfigurasi pelat sebagai elemen lentur murni (PBM), elemen lentur tiga titik (TPB) atau sebagai elemen dengan reaksi hiperstatik tulangan pelat dan momen lentur eksternal pelat (F&M); 8) Menentukan prediksi lebar retak maksimum w_{maks} berdasarkan pengertian *crack opening displacement* (COD) yang terjadi pada pelat beton serat kinerja tinggi sesuai dengan faktor intensitas tegangan K_I yang diketahui.

5.9.1 Diagram *moment-curvature* hasil uji lentur pelat HPFRC

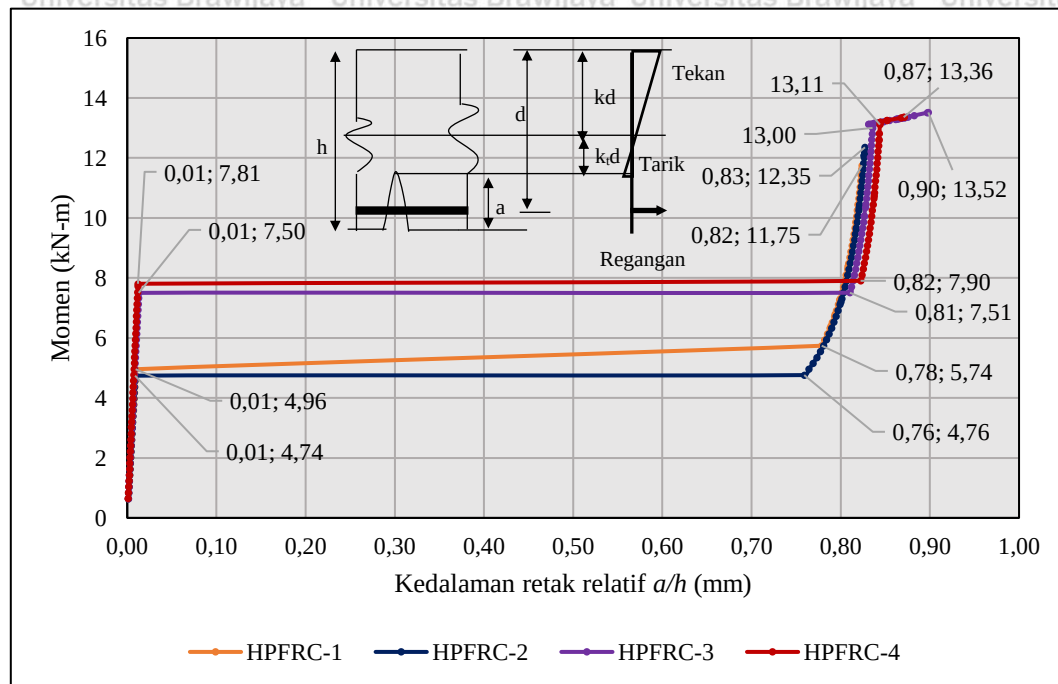
Diagram *Moment-Curvature* dari hasil analisis gaya dalam sesuai dengan pembacaan data pengujian pada pelat HPFRC pada Gambar 5.48 dapat digabungkan dalam bentuk diagram hubungan *Moment-Curvature* seperti pada Gambar 5.79. Terlihat adanya kesamaan perilaku pelat pada diagram *Moment-Curvature*. Pada awalnya, keempat pelat akan berperilaku elastis linier hingga terjadinya retakan pertama. Sesudah retak, akan terjadi penambahan kelengkungan secara tiba-tiba sebelum keempat pelat kembali berperilaku secara linier kembali untuk kedua kalinya. Perubahan ketiga akan terjadi jika terjadi leleh pada tulangan pelat. Sesudah baja tulangan leleh, maka momen tidak akan bertambah, namun kelengkungan akan terus bertambah hingga pelat mengalami keruntuhan.



Gambar 5. 79 Hubungan Moment-Curvature pelat HPFRC

5.9.2 Hubungan momen dan kedalaman retak relatif

Diagram *moment-curvature* pelat HPFRC pada Gambar 5.79 yang menggambarkan hubungan antara momen dan kelengkungan (*curvature*) untuk masing-masing pelat berdasarkan hasil uji lentur pelat HPFRC selanjutnya diubah untuk mendapatkan hubungan antara momen dengan kedalaman retak relatif (perbandingan kedalaman retak terhadap tebal pelat) yang terjadi sesuai dengan besaran momen yang bekerja. Dengan demikian akan didapatkan diagram hubungan momen dengan kedalaman retak relatif (*relative crack depth*) ($\xi = a/h$) pelat HPFRC. Hubungan ini disusun berdasar hasil analisis perkembangan kedalaman retak pelat, sejak dimulainya pembebanan lentur, pada saat terjadi retak pertama hingga terjadinya kegagalan (*failure*) pada keempat pelat HPFRC. Diagram ini disajikan pada Gambar 5.80.



Gambar 5. 80 Hubungan momen dan kedalaman retak relatif ($\xi = a/h$)

Berbeda dengan hubungan *moment-curvature* pada Gambar 5.79, hubungan momen dan kedalaman retak relatif pada Gambar 5.80 memperlihatkan bahwa sebelum terjadi retak pertama, pelat akan memperlihatkan perilaku elastis linier. Namun setelah retak pertama terjadi, akan timbul penambahan kedalaman retak relatif yang cukup besar. Selanjutnya pelat akan menunjukkan perilaku nonlinear hingga terjadinya leleh pada baja tulangan. Sesudah baja tulangan mencapai kuat lelehnya, maka pelat akan berperilaku linier kembali hingga terjadi keruntuhan atau *failure*.

Terlihat bahwa setelah terjadi retakan pertama akan terjadi perubahan kedalaman retak relatif yang sangat besar, yaitu untuk pelat HPFRC-1 dari (0,01; 4,96 kN-m) berubah menjadi (0,78 ; 5,74 kN-m). Untuk pelat HPFRC-2 berubah dari (0,01; 4,74 kN-m) menjadi (0,76; 4,76 kN-m). Pelat HPFRC-3 berubah dari (0,01; 7,50 kN-m) menjadi (0,81; 7,51 kN-m). Sedangkan pelat HPFRC-4 berubah dari (0,01; 7,81 kN-m) menjadi (0,82; 7,90 kN-m).

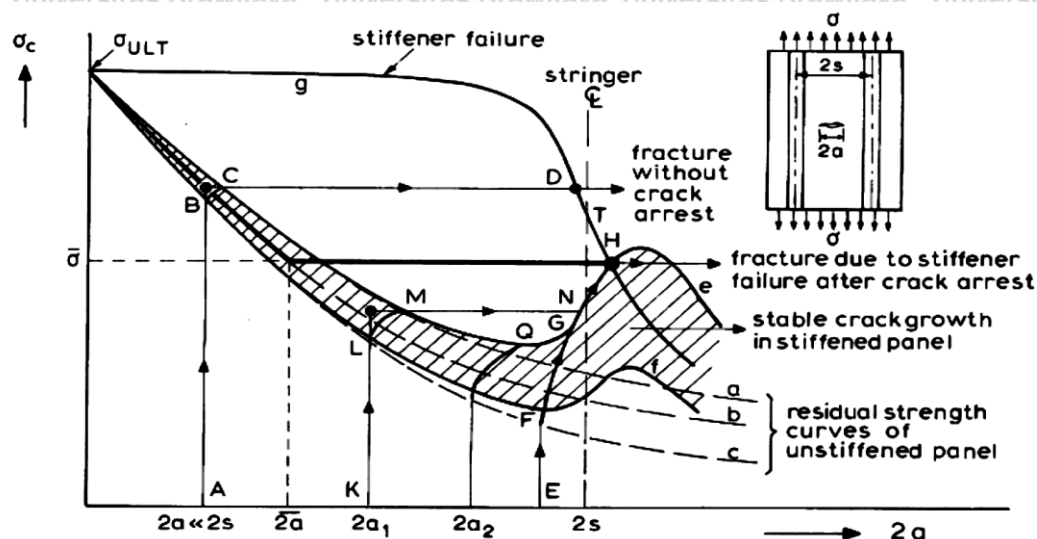
Dengan melihat bahwa besaran kedalaman retak relatif yang ada setelah retak pertama tersebut ternyata bernilai lebih dari 0,7, maka persamaan untuk menghitung faktor intensitas tegangan K_I dengan batasan $0 \leq a/h \leq 7$ yang dikembangkan oleh Carpinteri (Carpinteri, 1986), yang juga telah digunakan pada penelitian mengenai kinerja pelat beton ringan (Suseno, Soehardjono, Wardana, & Rachmansyah, 2018) dan penelitian mengenai beban berulang pada pelat beton pracetak (Soehardjono, Raka, & Suprobo, 2006), tidak dapat dipergunakan secara langsung. Perlu dilakukan modifikasi untuk disesuaikan dengan kedalaman retak relatif yang didapatkan pada pengujian pelat HPFRC ini. Apalagi untuk

pelat HPFRC-3 nilai kedalaman retak relatif pada saat terjadi keruntuhan mencapai nilai 0,90 pada saat momen mencapai 13,52 kN-m. Sementara yang lainnya adalah 0,82 untuk HPFRC-1, 0,83 untuk HPFRC-2 dan 0,87 untuk pelat HPFRC-4.

5.9.3 Diagram kekuatan sisa

Kekuatan struktur dapat dinyatakan sebagai beban P (beban fraktur) yang dapat ditahan struktur sebelum terjadi fraktur. Fraktur adalah perpecahan struktur yang hebat sekali (*the catastrophic break-up*) menjadi dua atau lebih. Kedalaman retak pada struktur dinyatakan dengan notasi a , kekuatan residu struktur setelah terjadi retakan dinyatakan dengan P_{res} . Jika beban $P = P_{res}$ terjadi maka fraktur terjadi. Pada struktur baru yang tanpa cacat ($a = 0$), kekuatan residu struktur P_{res} adalah P_u , yaitu kuat atau beban desain ultimit sebagai batas kekuatannya. Fraktur pasti terjadi saat struktur diberi beban sebesar P_u , kecuali jika struktur bersifat *over-design* (Broek, 1989).

Diagram kuat residu panel sederhana dengan dua pengaku, yang mengalami retak di pusatnya diperlihatkan pada Gambar 5.81. Garis a , b dan c menggambarkan kurva kuat residu panel tanpa pengaku. Karena adanya pengaku, faktor intensitas tegangan akan dikurangi dengan faktor $C_R < 1$, dengan $C_R = K_{stiffened}/K_{unstiffened}$. Dengan asumsi bahwa perambatan retak pada panel yang kaku terjadi pada faktor intensitas tegangan yang sama seperti pada panel tanpa pengaku, tegangan untuk menyebarkan retakan akan ditingkatkan dengan faktor $1/C_R$. Ini berarti bahwa garis a dan c masing-masing akan naik menjadi garis e dan f . Kurva-kurva ini menunjukkan nilai maksimum untuk retakan yang sedikit lebih besar daripada jarak pengaku karena pengurangan tegangan maksimum terjadi ketika retakan memanjang sedikit di luar garis tengah pengaku. Dalam panel yang kaku kemungkinan kegagalan pengaku juga harus diperhitungkan. Garis g adalah tempat untuk kegagalan pengaku. Ketika tidak ada retakan ($2a = 0$), pengaku akan gagal jika tegangan nominal sama dengan kuat tariknya. Ketika retakan mendekati pengaku, faktor konsentrasi beban L_s meningkat, sehingga pengaku akan gagal pada tegangan nominal yang lebih rendah. Garis g diperoleh dengan membagi kuat tarik utama pengaku dengan Faktor Konsentrasi Beban (Broek, 1982).



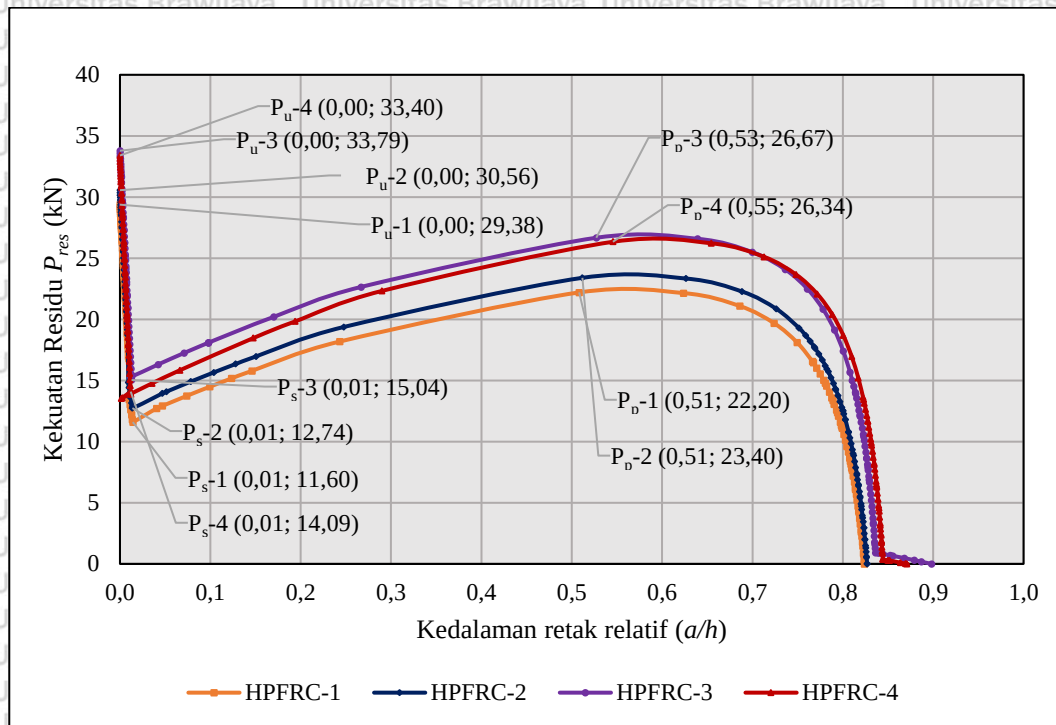
Gambar 5. 81 Diagram kuat residu untuk pelat dengan pengaku *underreinforced*.
Sumber: (Broek, 1982)

Besarnya kekuatan residu struktur pelat HPFRC-1 hingga HPFRC-4 berdasarkan beban fraktur diperlihatkan pada Gambar 5.82. Pada saat belum ada retakan dan belum diberikan pembebanan pada struktur pelat, maka besaran kekuatan residu P_u pelat HPFRC berkisar antara 29,38 kN hingga 33,79 kN. Pada saat terjadi retak pertama, maka kekuatan residu struktur pelat berada pada nilai P_s antara 11,60 kN hingga 15,04 kN. Sementara itu akibat bekerjanya kuat tarik baja tulangan yang berada di dalam struktur pelat, maka pada kondisi inelastis, dapat dicapai kekuatan residu struktur pelat P_p antara 22,20 kN hingga 26,67 kN.

Dalam desain, faktor keamanan (*safety factor*) yang diberi notasi j biasa digunakan. Untuk struktur teknik sipil nilainya sekitar 3 (Broek, 1989). Kekuatan residu pelat HPFRC-1 hingga HPFRC-4 pada Gambar 5.82 selanjutnya dirangkum pada Tabel 5.82 untuk mendapatkan nilai faktor keamanan struktur berdasarkan kekuatan residu menurut beban fraktur, baik j yang bernilai antara 2,23 hingga 2,52 maupun G yang bernilai antara 1,77 hingga 1,91.

Tabel 5. 82 Nilai Kekuatan Residu Dan Faktor Keamanan Struktur

Pelat	P_u kN	P_s kN	$j = P_u/P_s$	P_p kN	$G = P_p/P_s$
HPFRC-1	29,38	11,597	2,52	22,20	1,91
HPFRC-2	30,56	13,156	2,38	23,40	1,84
HPFRC-3	33,79	15,036	2,23	26,67	1,77
HPFRC-4	33,40	13,88	2,39	26,34	1,90

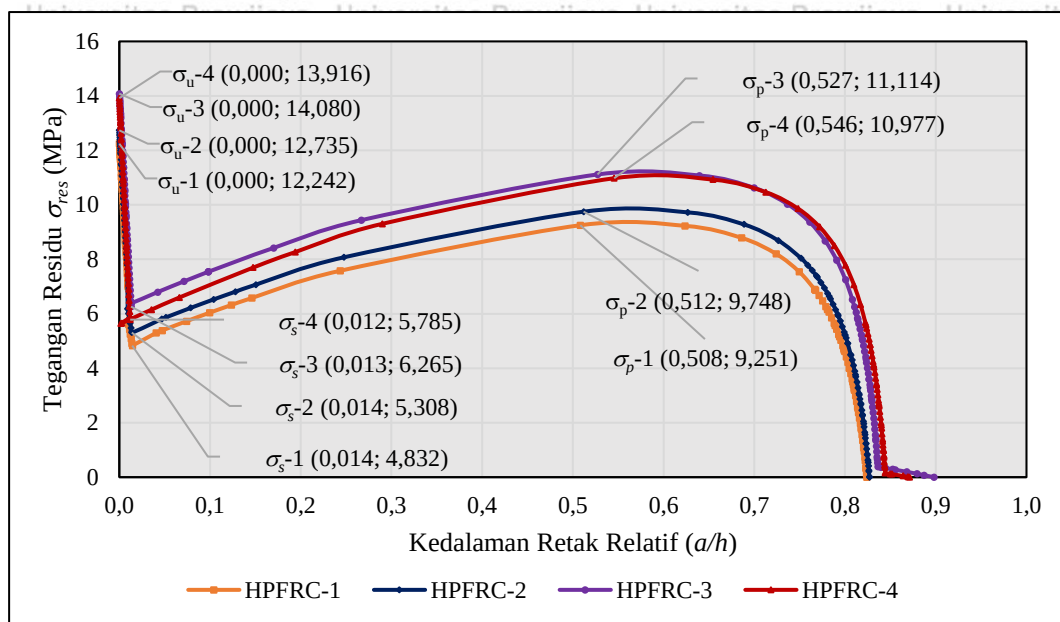


Gambar 5. 82 Hubungan beban residu (P_{res}) dan kedalaman retak (a) pelat HPFRC

Disamping disusun menggunakan beban fraktur, diagram kuat residu dapat pula disusun dengan menjadikan tegangan ultimit sebagai kekuatan residu pada saat tidak ada retakan pada pelat HPFRC. Pada saat kedalaman retak a masih nol, maka kekuatan pelat HPFRC dinyatakan menggunakan nilai σ_u atau kekuatan desain ultimit (*the ultimate design strength*). Nilai σ_u diperoleh dari nilai beban maksimum yang tercatat ketika pelat HPFRC mengalami runtuh lentur meskipun nilai f_c' beton ataupun f_y baja belum tercapai, yang dikenal dengan istilah kegagalan *slip (slippage)*, atau nilai beban maksimum ketika pelat HPFRC mengalami runtuh lentur setelah tulangan tarik mencapai nilai kuat lelehnya ($f_s = f_y$). Apabila tegangan akibat beban layan maksimum diantisipasi bernilai σ_s , maka struktur sebenarnya didesain untuk menahan beban sebesar $j \sigma_s = \sigma_u$. Apabila retakan terjadi, maka kekuatan struktur lebih kecil dari σ_u . Kekuatan yang tersisa setelah retak, disebut sebagai kuat residu (*residual strength*) σ_{res} .

Gambar 5.83 memperlihatkan hubungan antara kekuatan struktur yang dinyatakan sebagai tegangan residu σ_{res} yang dapat di tahan oleh pelat HPFRC dengan kedalaman retak relatif yang terjadi pada saat beban bekerja. Tegangan dihitung menggunakan data momen yang bekerja pada pelat HPFRC, Tegangan lentur dihitung dengan persamaan $\sigma = 6M/bh^2$. Gambar 5.83 menunjukkan bahwa kekuatan residu pelat berkurang secara drastis pada kondisi elastis hingga terjadinya retakan pertama pada pelat. Sesudah terjadinya retak pada

beton, maka kekuatan pelat menahan beban akan bergantung pada tulangan baja. Hal ini sesuai dengan penjelasan pada Gambar 5.81.



Gambar 5. 83 Hubungan kekuatan residu (σ_{res}) dan kedalaman retak relatif (ξ) pelat HPFRC

Pada Gambar 5.83 nilai tegangan σ terbesar yang tercatat pada saat pelat runtuh dijadikan sebagai nilai σ_u dengan nilai berkisar antara 12,242 MPa hingga 14,080 MPa. Selanjutnya nilai σ_s adalah nilai tegangan pada saat pelat mengalami retak pertama (nilai tegangan sisa terkecil pada kondisi elastis linier) dengan nilai antara 4,832 MPa hingga 6,265 MPa. Selanjutnya σ_p adalah nilai tegangan yang terjadi pada saat retak terus membesar sesudah retak pertama dan nilai tegangan sisa akibat beban mencapai nilai terbesar setelah retak (kondisi plastis) dengan nilai antara 9,251 MPa hingga 11,114 MPa. Nilai-nilai σ_u , σ_s dan σ_p beserta nilai faktor keamanan (j dan G) yang dihitung berdasar tegangan sisa dapat dilihat pada Tabel 5.83.

Tabel 5. 83 Nilai Kuat Sisa dan Faktor Keamanan Struktur

Pelat	σ_u MPa	σ_s MPa	$j = \sigma_u / \sigma_s$	σ_p MPa	$G = \sigma_p / \sigma_s$
HPFRC-1	12,16	4,83	2,52	9,25	1,91
HPFRC-2	12,65	5,31	2,38	9,75	1,84
HPFRC-3	13,97	6,25	2,24	11,10	1,78
HPFRC-4	13,81	5,84	2,37	10,98	1,88

5.9.4 Faktor konsentrasi tegangan

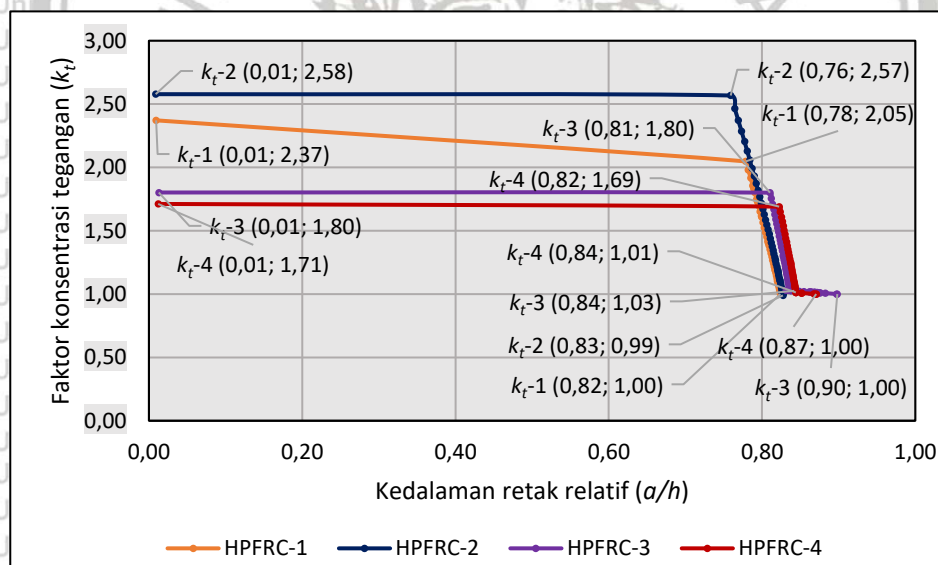
Faktor konsentrasi tegangan k_t adalah rasio antara tegangan lokal maksimum dan tegangan nominal, atau $k_t = \sigma_m / \sigma_0$. Jika nilai tegangan maksimum di ambil sebagai

tegangan pada saat pelat runtuh dan tegangan nominal di ambil pada saat pelat mengalami retak pertama, maka untuk keempat pelat HPFRC dapat ditentukan nilai faktor konsentrasi tegangannya sebagaimana terlihat pada tabel 5.84.

Tabel 5. 84 Faktor Konsentrasi Tegangan Pelat HPFRC

Pelat	σ_m MPa	σ_o MPa	k_t -
HPFRC-1	12.242	5.979	2.047
HPFRC-2	12.734	4.960	2.568
HPFRC-3	14.081	7.820	1.801
HPFRC-4	13.917	8.233	1.690

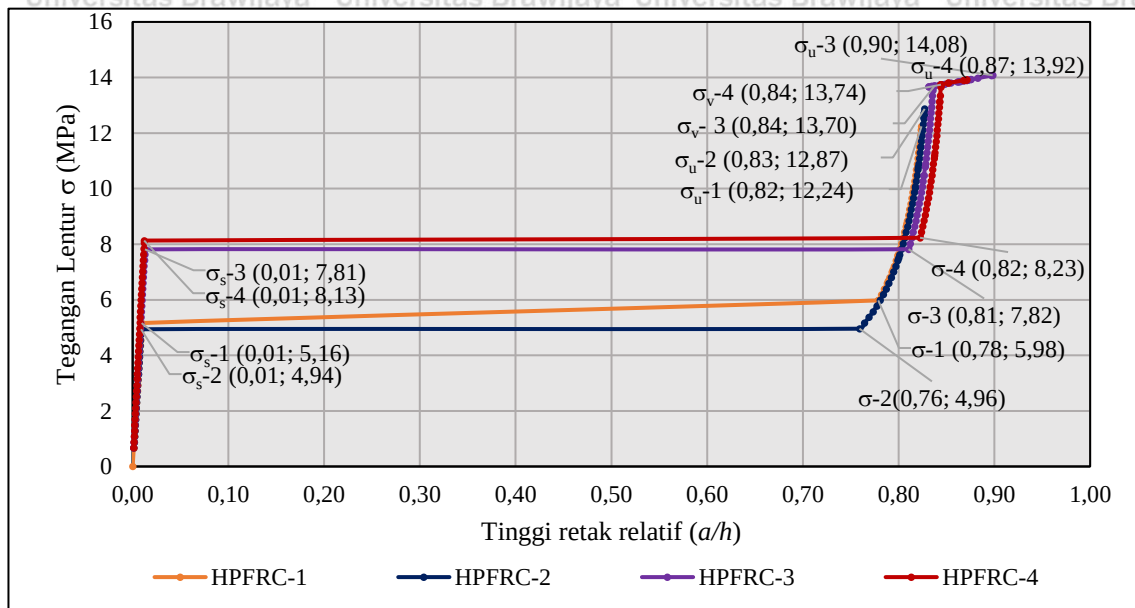
Dari tabel 5.84 terlihat bahwa untuk keempat pelat HPFRC yang diuji tersebut, pada saat terjadi retak pertama diperoleh nilai faktor konsentrasi tegangannya berkisar antara 1,69 hingga 2,57. Hal ini berarti bahwa retakan yang terjadi pada saat pelat runtuh cukup besar. Hubungan antara faktor konsentrasi tegangan pelat HPFRC dengan kedalaman retak relatif dapat dilihat pada Gambar 5.84.



Gambar 5. 84 Hubungan faktor konsentrasi tegangan (k_t) dan kedalaman retak relatif (ξ)

5.9.5 Tegangan lentur maksimum akibat beban total

Perhitungan diawali dengan membuat diagram hubungan tegangan lentur maksimum akibat beban total pada pelat HPFRC dengan kedalaman retak relatif ($\xi=a/h$) yang bersesuaian dengan tegangan tersebut sebagaimana terlihat pada Gambar 5.85. Momen diperhitungkan dengan persamaan $M = PL/4$, dan tegangan nominal dihitung dengan persamaan $\sigma = 6M/bh^2$.



Gambar 5.85 Hubungan tegangan lentur pada pelat HPFRC (σ) dan kedalaman retak relatif (ξ)

Hubungan tegangan lentur dan kedalaman retak relatif keempat pelat HPFRC menunjukkan pelat berperilaku elastis linier sebelum terbentuknya retak pertama. Selanjutnya sesudah terjadi retak pertama pelat akan mengalami penurunan tegangan nominal σ sejalan dengan meningkatnya kedalaman retak relatif ξ . Selanjutnya bersamaan dengan meningkatnya kembali tegangan nominal, maka akan terbentuk retakan kedua dan seterusnya sehingga tercapai kondisi kegagalan lentur atau failure. Sejak terjadinya retak pertama hingga pelat runtuh atau failure pelat HPFRC menunjukkan perilaku non-linier. Nilai tegangan nominal maksimum σ_{ys} dan kedalaman retak relatif ξ pada saat terjadi keruntuhan pelat HPFRC dapat dilihat pada Tabel 5.85.

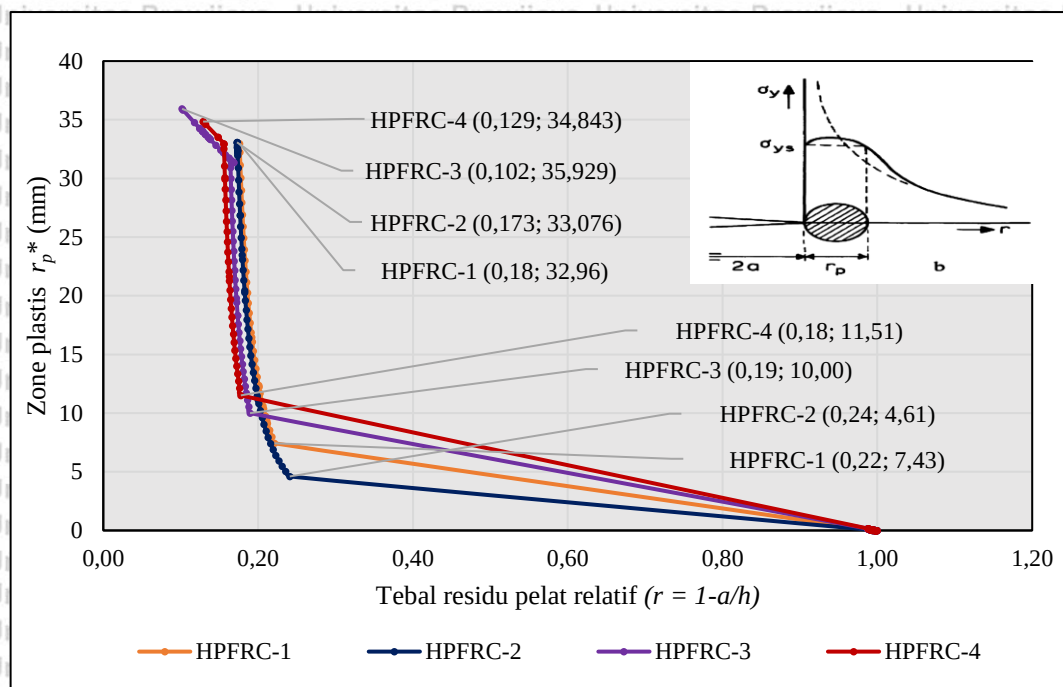
Tabel 5.85 Tegangan Pelat HPFRC saat Runtuh dan Kedalaman Retak Relatif

	σ_{ys}	ξ
	Mpa	-
HPFRC-1	12,242	0,824
HPFRC-2	12,870	0,827
HPFRC-3	14,081	0,898
HPFRC-4	13,917	0,871

5.9.6 Daerah plastis ujung retakan

Penentuan nilai daerah plastis ujung retakan dilaksanakan dengan cara menentukan nilai tegangan maksimum yang diberi notasi σ_{ys} . Dengan menggunakan persamaan (4-71) $r_p^* = \sigma^2 a / 2 \sigma_{ys}^2$ maka ukuran daerah plastis ujung retakan untuk keempat pelat HPFRC dapat dihitung dan digambarkan hubungannya dengan tebal pelat residu relatif dalam Gambar

5.86. Tebal pelat residu adalah ketebalan pelat sisa yang tidak retak atau tebal pelat awal dikurangi kedalaman retak relatif.



Gambar 5. 86 Ukuran daerah plastis ujung retakan pada pelat HPFRC

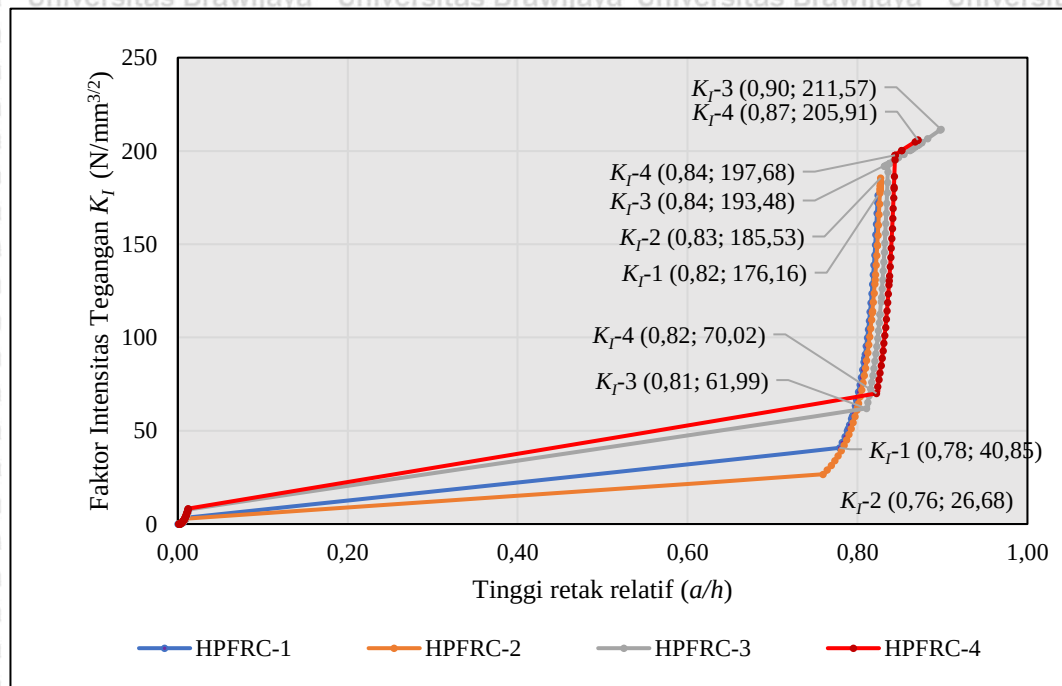
Daerah plastis ujung retakan (*crack tip plastic zone*) ini nilainya akan sama untuk setiap benda uji, baik dihitung berdasar beban luar yang bekerja (pelat sebagai *pure bending elemen* atau pelat sebagai elemen *three point bending*), maupun jika dihitung menggunakan reaksi hiperstatik tulangan dan momen yang di analisis sebagai akibat bekerjanya beban. Hal ini disebabkan karena daerah plastis ujung retakan dihitung berdasarkan pada tegangan nominal dan tegangan leleh pelat sesuai dengan jenis beban yang digunakan sebagai dasar perhitungan .

Tabel 5. 86 Daerah Plastis Ujung Retakan Dan Kedalaman Retak Relatif Pelat HPFRC

Pelat	σ_{ys} Mpa	$r = 1-\xi$ mm/mm	r_p^* mm
HPFRC-1	12.242	0.176	32.956
HPFRC-2	12.734	0.173	33.076
HPFRC-3	14.081	0.102	35.929
HPFRC-4	13.917	0.129	34.843

5.9.7 Faktor intensitas tegangan K_I dan fracture toughness K_{IC}

Dengan menyesuaikan persamaan (4-71) menjadi $K_I = \sigma_y \sqrt{2\pi r_p^*}$ dapat dihitung nilai Faktor Intensitas Tegangan (K_I) pada keempat pelat HPFRC sebagaimana terlihat pada Gambar 5.87.



Gambar 5.87 Hubungan faktor intensitas tegangan (K_I) dan kedalaman retak relatif (ξ)

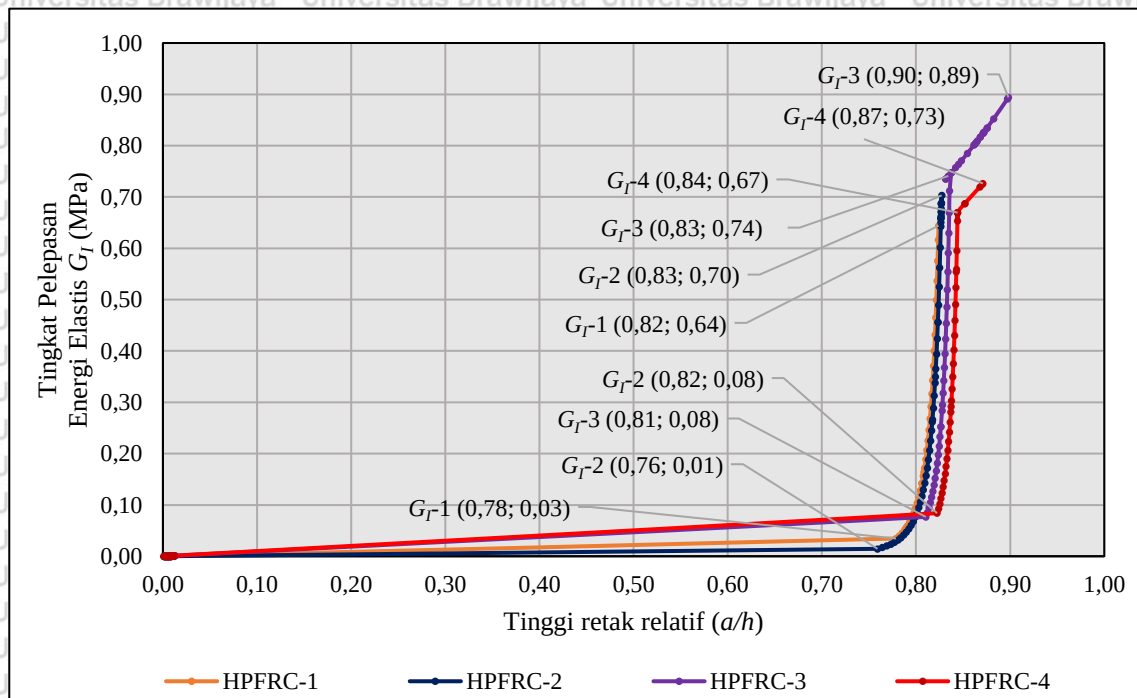
Dari hubungan Faktor Intensitas Tegangan K_I dengan kedalaman retak relatif (ξ) tersebut dapat diketahui nilai ukuran ketahanan retak bahan atau *Fracture Toughness* pelat HPFRC seperti tertuang dalam Tabel 5.86.

Tabel 5.87 *Fracture Toughness* dan Kedalaman Retak Relatif Pelat HPFRC

	K_{IC} $N/mm^{3/2}$	ξ -
HPFRC-1	176,162	0,824
HPFRC-2	185,529	0,827
HPFRC-3	211,565	0,898
HPFRC-4	205,911	0,872

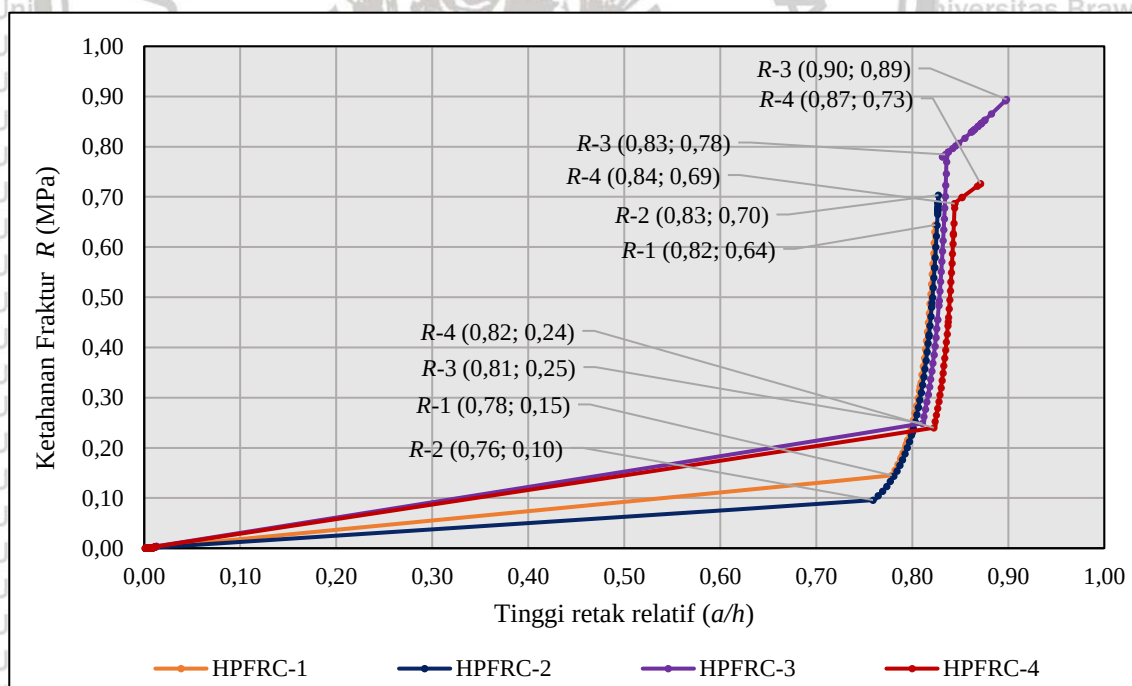
5.9.8 Tingkat pelepasan energi elastis (G_I) dan ketahanan fraktur (R)

Tingkat pelepasan energi elastis untuk pelat yang dihitung berdasarkan kondisi *plane stress* dilaksanakan dengan menggunakan persamaan $G_I = K_I^2 / E$ sesuai dengan persamaan (4-85). E adalah Modulus elastisitas beton. Besarnya tingkat pelepasan energi elastis dapat dilihat pada Gambar 5.88.



Gambar 5.88 Hubungan tingkat pelepasan energi G_I dan kedalaman retak relatif (ξ)

Ketahanan fraktur dihitung sesuai dengan persamaan (4-88) dengan persamaan $R = \pi \sigma^2 a/E$. Perkembangan nilai ketahanan fraktur dapat dilihat pada Gambar 5.89.

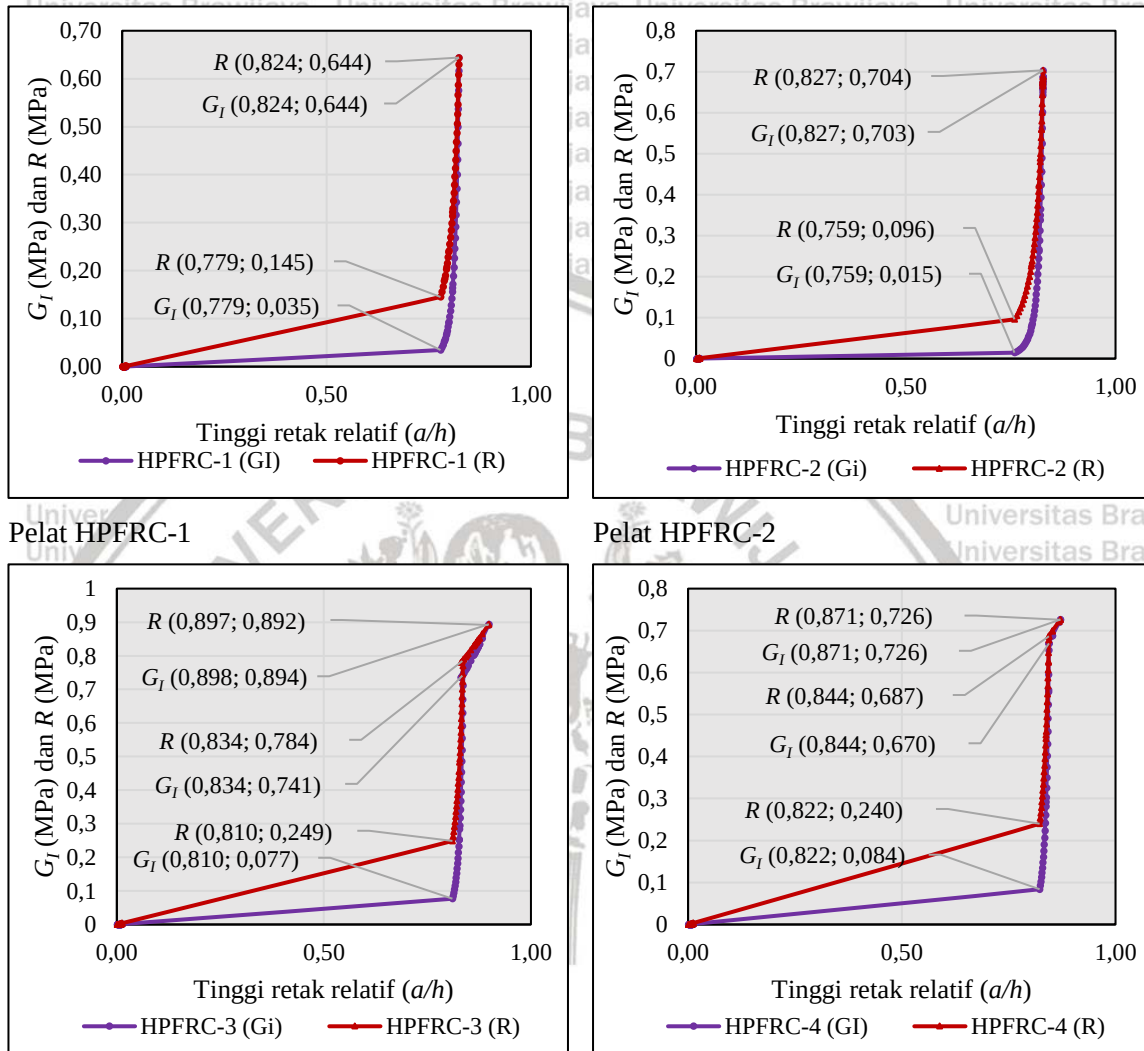


Gambar 5.89 Hubungan ketahanan fraktur R dan kedalaman retak relatif (ξ)

Menurut konsep keseimbangan energi, ada keseimbangan kontinu antara energi yang dilepas dan energi yang dikonsumsi selama pertumbuhan retak terjadi stabil dan lambat. Jika

tidak ada keseimbangan, maka pertumbuhan retakan akan berhenti atau menjadi tidak stabil.

Fraktur akan terjadi jika tingkat pelepasan energi regangan G sama dengan energi fraktur atau resistansi fraktur R . Perkembangan tingkat pelepasan energi dan ketahanan fraktur sesuai dengan perkembangan kedalaman retak relatif diperlihatkan pada Gambar 5.90.



Pelat HPFRC-3

Pelat HPFRC-4

Gambar 5.90 Tingkat pelepasan energi (G_I) dan ketahanan fraktur (R) pelat HPFRC

Adapun besarnya nilai tingkat pelepasan energi elastis kritis G_{IC} dihitung dengan persamaan $G_{IC} = (\pi \sigma_c^2 a)/E$. Sedangkan nilai ketahanan fraktur yang dihitung dengan persamaan $R = K_c^2/E$. Hasilnya untuk masing-masing pelat HPFRC dapat pada Tabel 5.88.

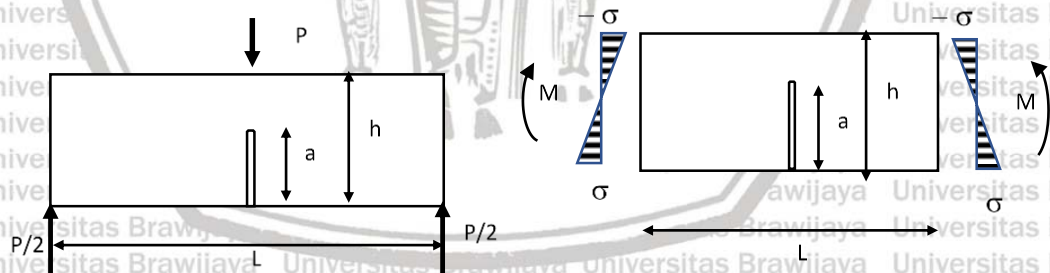
Tabel 5. 88 Tingkat Pelepasan Energi Elastis Kritis G_{IC} , Nilai Ketahanan Fraktur R dan Kedalaman Retak Relatif (ξ)

Pelat	G_{IC} N/mm	R N/mm	ξ -
HPFRC-1	0,644	0,644	0,824
HPFRC-2	0,689	0,689	0,827
HPFRC-3	0,889	0,889	0,896
HPFRC-4	0,726	0,726	0,871

5.9.9 Persamaan faktor intensitas tegangan pelat HPFRC

Perhitungan faktor intensitas tegangan yang terjadi pada pelat HPFRC dapat dilakukan dengan mengikuti pola analisis untuk elemen lentur murni (*pure bending element* - PBE) atau elemen lentur tiga titik (*three point bending* - TPB) seperti pada Gambar 5.91. Di samping itu perhitungan faktor intensitas tegangan juga bisa dilaksanakan dengan memperhitungkan reaksi hiperstatik tulangan F dan momen lentur M (F&M) yang timbul akibat gaya dalam pada penampang pelat.

Untuk menentukan nilai faktor intensitas tegangan akibat reaksi hiperstatik tulangan dan momen lentur yang muncul akibat aliran plastis tulangan karena leleh baja atau karena *slippage* batang tulangan, maka harus diambil asumsi bahwa gaya dalam (gaya tarik baja dan momen) yang bekerja pada penampang pelat diasumsikan sebagai beban yang bekerja pada elemen pelat beton tersebut. Gaya tarik yang ditahan oleh baja diubah sebagai beban pada penampang beton dan diperhitungkan sebagai reaksi hiperstatik tulangan.

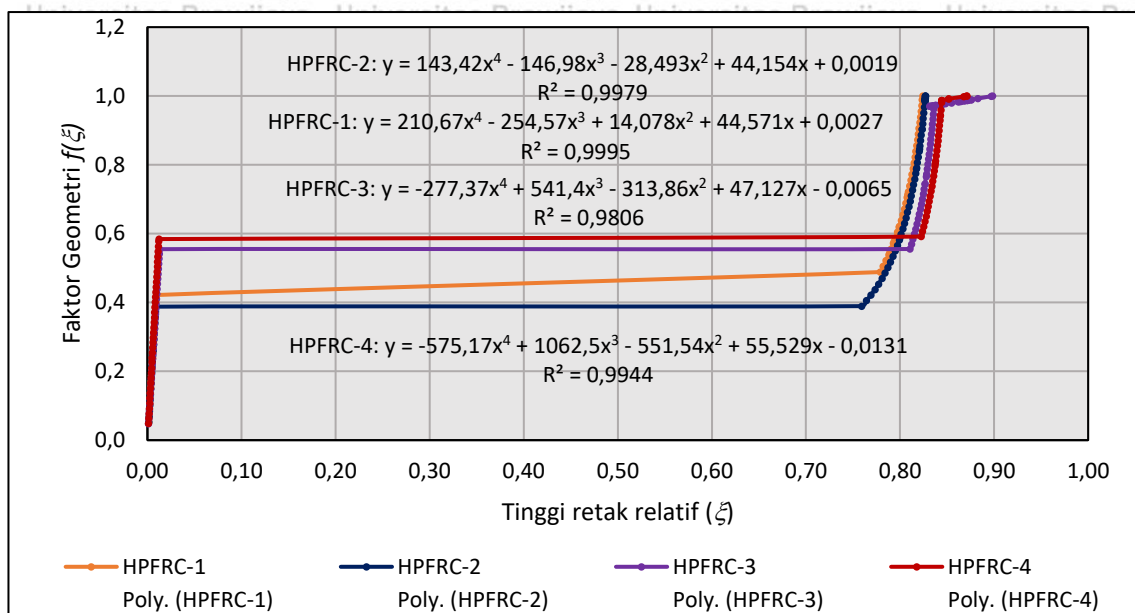


Gambar 5. 91 Elemen pengujian lentur dengan metode (a) *three-point bending* dan (b) lentur murni (*pure bending element*)

Sumber: (Tada, Paris, & Irwin, 2000)

Sesudah nilai Faktor intensitas tegangan K_I dan *Fracture Toughness* K_{IC} diketahui, selanjutnya dibuat persamaan faktor geometri $f(\xi)$ berdasarkan persamaan faktor intensitas tegangan (4-73) dengan bentuk $K_I = \sigma \sqrt{\pi a} f(\xi)$. Nilai faktor geometri bisa diperoleh dengan menggunakan persamaan $f(\xi) = K_I / \sigma \sqrt{\pi a}$ dan hasil perhitungannya dapat dilihat pada Gambar 5.92 yang menunjukkan hubungan faktor geometri $f(\xi)$ dengan kedalaman retak relatif ($\xi = a/h$) pelat HPFRC. Dengan menggunakan persamaan *polynomial* order 4

hubungan antara faktor geometri $f(\xi)$ dengan kedalaman retak relatif (ξ) pelat HPFRC ditulis seperti pada Gambar 5.92 dan Tabel 5.89.



Gambar 5. 92 Hubungan faktor geometri $f(\xi)$ dengan kedalaman retak relatif (ξ)

Tabel 5. 89 Hubungan Faktor Geometri dan Kedalaman Retak Relatif

Pelat	$(\xi = a/h)$	Faktor geometri : $f(\xi)$
HPFRC-1	0,82	$f(\xi) = 0,0027 + 44,571\xi + 14,078\xi^2 - 254,57\xi^3 + 210,67\xi^4$
HPFRC-2	0,83	$f(\xi) = 0,0019 + 44,154\xi - 28,493\xi^2 - 146,98\xi^3 + 143,42\xi^4$
HPFRC-3	0,90	$f(\xi) = -0,0065 + 47,127\xi - 313,86\xi^2 + 541,4\xi^3 - 277,37\xi^4$
HPFRC-4	0,87	$f(\xi) = -0,0131 + 55,529\xi - 551,54\xi^2 + 1062,5\xi^3 - 575,17\xi^4$

Dengan mengacu pada persamaan $K_I = \sigma \sqrt{\pi a} f(\xi)$ maka diperoleh persamaan faktor intensitas tegangan untuk masing-masing pelat dengan menggunakan nilai $f(\xi)$ pada Tabel 5.90.

Tabel 5. 90 Persamaan Faktor Intensitas Tegangan Pelat HPFRC

Pelat	Faktor geometri : $f(\xi)$
HPFRC-1	$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} (0,0027 + 44,571\xi + 14,078\xi^2 - 254,57\xi^3 + 210,67\xi^4)$
HPFRC-2	$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} (0,0019 + 44,154\xi - 28,493\xi^2 - 146,98\xi^3 + 143,42\xi^4)$
HPFRC-3	$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} (-0,0065 + 47,127\xi - 313,86\xi^2 + 541,4\xi^3 - 277,37\xi^4)$
HPFRC-4	$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} (-0,0131 + 55,529\xi - 551,54\xi^2 + 1062,5\xi^3 - 575,17\xi^4)$

a. Konfigurasi elemen lentur murni (PBE)

Apabila pelat diperlakukan sebagai elemen lentur murni (*the pure bending element*), maka nilai tegangan $\sigma = 6M/bh^2$ disubstitusikan ke dalam persamaan pada Tabel 5.90, sehingga persamaan faktor intensitas tegangan dapat ditulis sebagaimana terlihat pada Tabel 5.91.

Tabel 5. 91 Persamaan Faktor Intensitas Tegangan Pelat HPFRC

Pelat	Faktor geometri : $f(\xi)$
HPFRC-1	$K_I = \frac{6M}{bh^{3/2}} \sqrt{\pi} \xi^{1/2} (0,0027 + 44,571\xi + 14,078 \xi^2 - 254,57 \xi^3 + 210,67 \xi^4)$
HPFRC-2	$K_I = \frac{6M}{bh^{3/2}} \sqrt{\pi} \xi^{1/2} (0,0019 + 44,154\xi - 28,493 \xi^2 - 146,98 \xi^3 + 143,42 \xi^4)$
HPFRC-3	$K_I = \frac{6M}{bh^{3/2}} \sqrt{\pi} \xi^{1/2} (-0,0065 + 47,127 \xi - 313,86 \xi^2 + 541,4 \xi^3 - 277,37 \xi^4)$
HPFRC-4	$K_I = \frac{6M}{bh^{3/2}} \sqrt{\pi} \xi^{1/2} (-0,0131 + 55,529 \xi - 551,54 \xi^2 + 1062,5 \xi^3 - 575,17 \xi^4)$

Persamaan faktor intensitas tegangan pada Tabel 5.91 bisa disederhanakan menjadi seperti terlihat pada Tabel 5.92

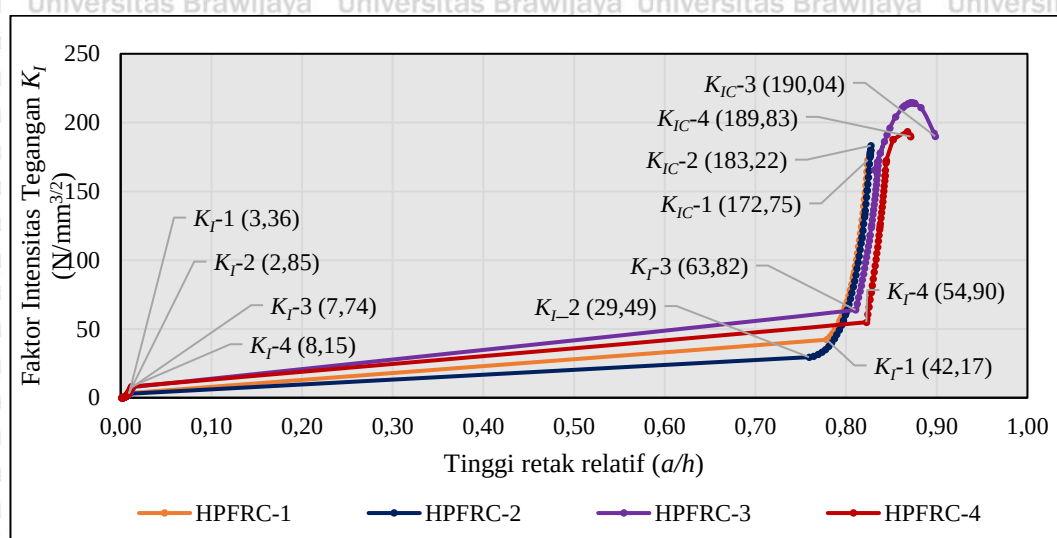
Tabel 5. 92 Persamaan Faktor Intensitas Tegangan dengan Konfigurasi Pelat HPFRC sebagai Elemen Lentur Murni (PBE)

Pelat	Faktor geometri : $f(\xi)$
HPFRC-1	$K_I = \frac{M}{bh^{3/2}} [6 (0,0048 \xi^{1/2} + 79,00 \xi^{3/2} + 24,953 \xi^{5/2} - 451,214 \xi^{7/2} + 373,403 \xi^{9/2})]$
HPFRC-2	$K_I = \frac{M}{bh^{3/2}} [6 (0,0034 \xi^{1/2} + 78,261 \xi^{3/2} - 50,503 \xi^{5/2} - 260,515 \xi^{7/2} + 254,205 \xi^{9/2})]$
HPFRC-3	$K_I = \frac{M}{bh^{3/2}} [6 (-0,0115 \xi^{1/2} + 83,530 \xi^{3/2} - 556,302 \xi^{5/2} + 959,607 \xi^{7/2} - 491,626 \xi^{9/2})]$
HPFRC-4	$K_I = \frac{M}{bh^{3/2}} [6 (-0,0232 \xi^{1/2} + 98,423 \xi^{3/2} - 977,579 \xi^{5/2} + 1883,232 \xi^{7/2} - 1019,626 \xi^{9/2})]$

Dengan persamaan $K_I = \frac{M}{bh^{3/2}} f(\xi)$ untuk masing-masing pelat HPFRC tersebut, maka faktor intensitas tegangan masing-masing pelat dihitung ulang. Nilai faktor intensitas tegangan K_I ini sebagaimana ditampilkan pada Gambar 5.93 akan dipergunakan untuk menghitung bukaan retak CTOD, COD, dan COD_{maks}. Besaran nilai *fracture Toughness* dapat dilihat pada Tabel 5.93.

Tabel 5. 93 *Fracture Toughness* Pelat HPFRC Dengan Konfigurasi Elemen Lentur Murni (PBE)

Pelat	K_{IC} N/mm ^{3/2}	ξ
HPFRC-1	172,752	0.824
HPFRC-2	183,218	0.827
HPFRC-3	190,041	0.898
HPFRC-4	189,834	0.871



Gambar 5. 93 Faktor intensitas tegangan K_I dengan konfigurasi elemen lentur murni (PBE)

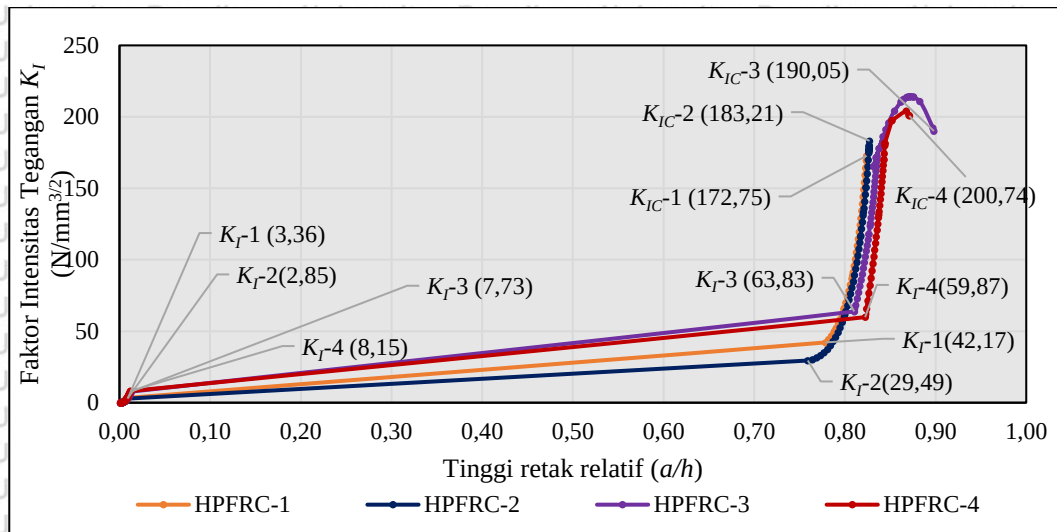
b. Konfigurasi elemen lentur tiga titik (TPB)

Dengan mengacu pada persamaan $K_I = \sigma \sqrt{\pi a} f(\xi)$ dan persamaan faktor intensitas tegangan pada Tabel 5.90, apabila pelat HPFRC diperlakukan sebagai elemen lentur tiga titik (*the three point bending element*) atau $M = \frac{1}{4} PL$, maka persamaan faktor intensitas tegangan pada Tabel 5.92 dapat ditulis sebagai $K_I = \frac{PL}{bh^{3/2}} f(\xi)$ dengan persamaan lengkapnya seperti terlihat pada Tabel 5.94.

Tabel 5. 94 Persamaan Faktor Intensitas Tegangan Dengan Konfigurasi Pelat HPFRC Sebagai Elemen Lentur Tiga Titik (TPB)

Pelat	Faktor geometri : $f(\xi)$
HPFRC-1	$K_I = \frac{PL}{bh^{3/2}} [0,0072\xi^{1/2} + 118,50\xi^{3/2} + 37,429\xi^{5/2} - 676,82\xi^{7/2} + 560,104\xi^{9/2}]$
HPFRC-2	$K_I = \frac{PL}{bh^{3/2}} [0,0051\xi^{1/2} + 117,391\xi^{3/2} - 75,754\xi^{5/2} - 390,773\xi^{7/2} + 381,308\xi^{9/2}]$
HPFRC-3	$K_I = \frac{PL}{bh^{3/2}} [-0,0173\xi^{1/2} + 125,296\xi^{3/2} - 834,4542\xi^{5/2} + 1439,41\xi^{7/2} - 737,438\xi^{9/2}]$
HPFRC-4	$K_I = \frac{PL}{bh^{3/2}} [-0,0348\xi^{1/2} + 147,634\xi^{3/2} - 1466,369\xi^{5/2} + 2824,848\xi^{7/2} - 1529,193\xi^{9/2}]$

Diagram faktor intensitas tegangan K_I dengan konfigurasi elemen lentur tiga titik (TPB) dapat dilihat pada Gambar 5.94. Sedangkan fracture Toughness nya ditampilkan pada Tabel 5.95.



Gambar 5. 94 Faktor intensitas tegangan K_I dengan konfigurasi elemen lentur tiga titik (TPB)

Tabel 5. 95 Fracture Toughness Pelat HPFRC Dengan Konfigurasi Elemen Lentur Tiga Titik (TPB)

	K_{IC} N/mm ^{3/2}	ξ -
HPFRC-1	172.752	0.824
HPFRC-2	183.210	0.827
HPFRC-3	190.055	0.898
HPFRC-4	200.740	0.871

5.9.10 Persamaan lebar retak pada pelat HPFRC satu arah

Lebar retak pada ujung retakan yang dihitung sebagai perpindahan bukaan ujung retak dihitung dengan persamaan $CTOD = \frac{4}{\pi} \frac{K^2}{E \sigma_{ys}}$.. Sementara itu pada level tulangan, bukaan retak dihitung dengan cara memasukkan nilai $x = 20$ mm ke dalam persamaan $COD =$

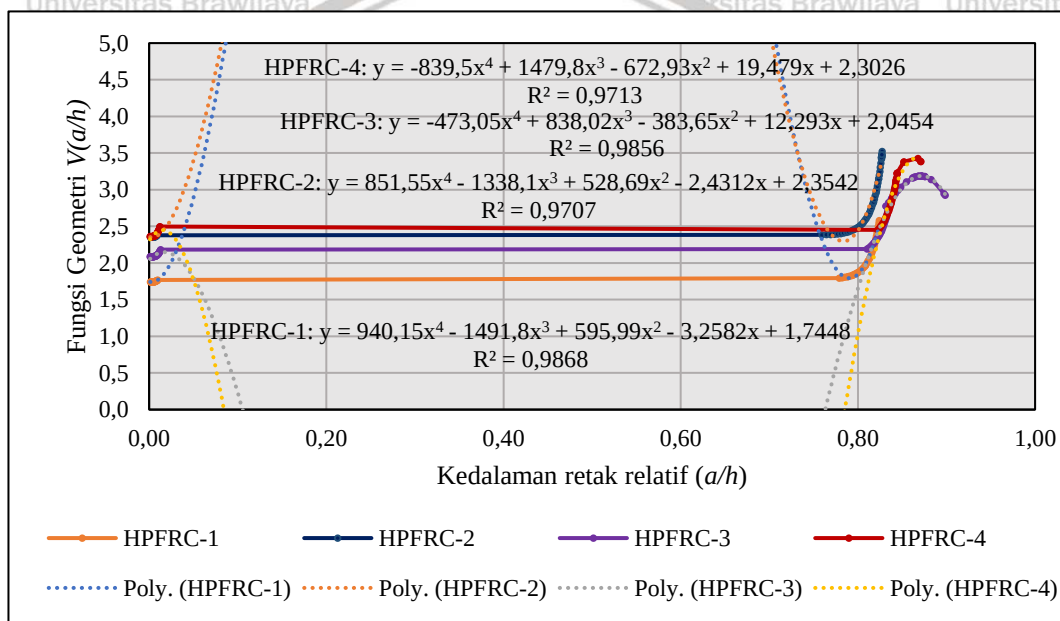
$\frac{4\sigma}{E} \sqrt{a^2 + \frac{E^2}{16\sigma^2} (CTOD)^2 - x^2}$. Bukaan retak maksimum dihitung dengan persamaan $COD_{max} = \frac{4\sigma}{E} \left[a + \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_{ys}^2} \right]$. pada kasus deformasi elastis maupun deformasi plastis COD proporsional dengan lebar retak dan ditulis dengan persamaan $COD = C_1 \frac{p}{E} a$ untuk kasus deformasi elastis atau $COD = C_1 \frac{p}{E} (a + r_p^*)$ untuk kasus deformasi plastis (Broek, 1982).

Untuk itu koefisien C_1 diperoleh dengan membandingkan bukaan retak hasil pengujian

dengan nilai COD yang diperoleh dari hasil analisis. Nilai koefisien ini digunakan untuk menyusun persamaan lebar retak w_{maks} .

a. Persamaan lebar retak elemen lentur murni (PBE)

Dari nilai-nilai COD_{maks} yang telah didapat selanjutnya ditentukan terlebih dahulu nilai koefisien C_1 berdasar nilai COD_{maks} yang telah didapat dari hasil pengujian laboratorium dibagi dengan nilai COD_{maks} pada analisis ini. Hasilnya diketahui adalah sebesar $C_1 = 1,702$ untuk HPFRC-1, $C_1 = 2,3$ untuk pelat HPFRC-2, $C_1 = 2,04$ untuk pelat HPFRC-3, dan $C_1 = 2,321$ untuk pelat HPFRC-4. Fungsi faktor geometri selanjutnya ditentukan guna memenuhi persamaan $w_{maks} = \frac{4\sigma a}{E} V(\xi)$ sebagaimana terlihat pada Gambar 5.95.



Gambar 5.95 Hubungan faktor geometri $V(\xi)$ dengan kedalaman retak relatif (ξ)

Dengan menggunakan persamaan polynomial order 4 untuk faktor geometri pada Gambar 5.95, maka persamaan lebar retak pelat HPFRC dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan $w_{maks} = \frac{4\sigma a}{E} V(\xi)$ sebagaimana terlihat pada Tabel 5.96.

Tabel 5.96 Persamaan Lebar Retak Pelat HPFRC Dengan Persamaan Tegangan

Pelat	Persamaan lebar retak maksimum
HPFRC-1	$w_{maks} = \frac{4\sigma a}{E} (1,7448 - 3,2582 \xi + 595,99 \xi^2 - 1491,8 \xi^3 + 940,15 \xi^4)$
HPFRC-2	$w_{maks} = \frac{4\sigma a}{E} (2,3542 - 2,4312 \xi + 528,69 \xi^2 - 1338,1 \xi^3 + 851,55 \xi^4)$
HPFRC-3	$w_{maks} = \frac{4\sigma a}{E} (2,0454 + 12,293 \xi - 383,65 \xi^2 + 838,02 \xi^3 - 473,05 \xi^4)$
HPFRC-4	$w_{maks} = \frac{4\sigma a}{E} (2,3026 + 19,479 \xi - 672,93 \xi^2 + 1479,8 \xi^3 - 839,5 \xi^4)$

Persamaan lebar retak pelat HPFRC sebagai elemen lentur murni (*pure bending element*-PBE) dapat diperoleh dengan mensubstitusikan persamaan tegangan $\sigma = 6M/bh^2$ ke dalam persamaan pada Tabel 5.96. Dengan demikian persamaan lebar retak w_{maks} untuk masing-masing pelat HPFRC yang diuji adalah seperti terlihat pada Tabel 5.97.

Tabel 5. 97 Persamaan Lebar Retak Pelat HPFRC Dengan Konfigurasi Sebagai Elemen Lentur Murni (PBE)

Pelat	Persamaan lebar retak
HPFRC-1	$w_{maks} = \frac{M}{Ebh} (41,88 \xi - 78,20 \xi^2 + 14303,76 \xi^3 - 35803,20 \xi^4 + 22563,60 \xi^5)$
HPFRC-2	$w_{maks} = \frac{M}{Ebh} (56,50 \xi - 58,35 \xi^2 + 12688,56 \xi^3 - 32114,40 \xi^4 + 20437,20 \xi^5)$
HPFRC-3	$w_{maks} = \frac{M}{Ebh} (49,09 \xi + 295,03 \xi^2 - 9207,60 \xi^3 + 20112,48 \xi^4 - 11353,20 \xi^5)$
HPFRC-4	$w_{maks} = \frac{M}{Ebh} (55,26 \xi + 465,10 \xi^2 - 16150,32 \xi^3 + 35515,20 \xi^4 - 20148,00 \xi^5)$

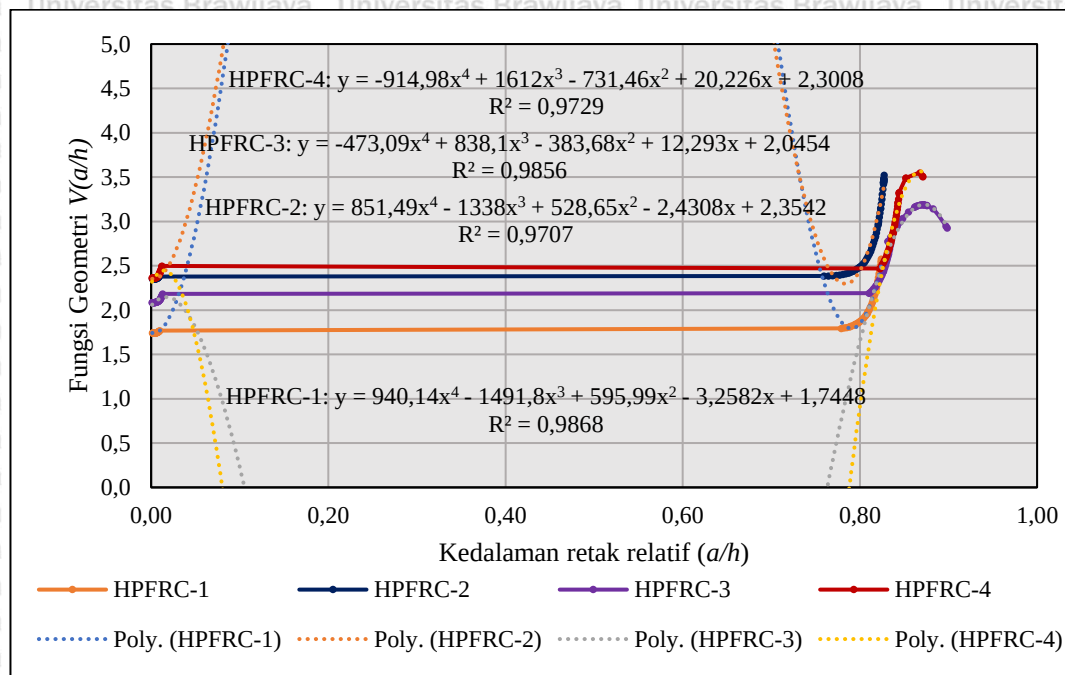
Nilai prediksi lebar retak untuk kondisi saat retak awal, sata baja leleh dan saat pelat runtuh sebagai hasil perhitungan dengan persamaan pada Tabel 5.97 yang diterapkan pada pelat HPFRC dapat dilihat pada Tabel 5.98.

Tabel 5. 98 Prediksi Lebar Retak Maksimum

Label	Kadar serat	Kuat Tekan (Mpa)	Saat retak awal		Saat baja leleh		Saat pelat runtuh	
			P_e	w_e	P_y	w_y	P_u	w_u
			(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)
HPFRC-1	0,4 %	54,35	14,350	0,058	-	-	29,381	0,169
HPFRC-2	0,6 %	55,49	11,903	0,063	-	-	30,562	0,230
HPFRC-3	0,8 %	60,68	18,769	0,083	32,887	0,206	33,794	0,238
HPFRC-4	1,0 %	67,67	19,759	0,080	33.126	0,201	33.400	0,217

b. Persamaan lebar retak elemen lentur tiga titik (TPB)

Dari nilai-nilai COD_{maks} ditentukan terlebih dahulu berdasar hasil pengujian dan berdasar hasil analisis. Selanjutnya ditentukan nilai koefisien C_I berdasar nilai COD_{maks} yang telah didapat dari hasil pengujian laboratorium dibagi dengan nilai COD_{maks} pada analisis ini. Hasilnya diketahui adalah sebesar $C_I = 1,702$ untuk HPFRC-1, $C_I = 2,3$ untuk pelat HPFRC-2, $C_I = 2,04$ untuk pelat HPFRC-3, dan $C_I = 2,321$ untuk pelat HPFRC-4. Fungsi faktor geometri ditentukan guna memenuhi persamaan $w_{maks} = \frac{4\sigma_a}{E} V(\xi)$ sebagaimana terlihat pada Gambar 5.96. Persamaan lebar retaknya adalah seperti terlihat pada Tabel 5.99.



Gambar 5. 96 Hubungan faktor geometri $V(\xi)$ dengan kedalaman retak relatif (ξ)

Tabel 5. 99 Persamaan Lebar Retak Pelat HPFRC

Pelat	Persamaan lebar retak
HPFRC-1	$w_{maks} = \frac{4\sigma a}{E} (1,7448 \xi - 3,2582 \xi^2 + 595,99 \xi^3 - 1491,8 \xi^4 + 940,14 \xi^5)$
HPFRC-2	$w_{maks} = \frac{4\sigma a}{E} (2,3542 \xi - 2,4308 \xi^2 + 528,65 \xi^3 - 1338,0 \xi^4 + 851,49 \xi^5)$
HPFRC-3	$w_{maks} = \frac{4\sigma a}{E} (2,0454 \xi + 12,293 \xi^2 - 383,68 \xi^3 + 838,1 \xi^4 - 473,09 \xi^5)$
HPFRC-4	$w_{maks} = \frac{4\sigma a}{E} (2,3008 \xi + 20,226 \xi^2 - 731,46 \xi^3 + 1612,0 \xi^4 - 914,98 \xi^5)$

Persamaan lebar retak pelat HPFRC sebagai elemen lentur tiga titik (*three point bending* - TPB) bisa diperoleh dengan mensubstitusikan persamaan tegangan $\sigma = 6M/bh^2$ dan persamaan momen $M = \frac{1}{4} PL$ ke dalam persamaan pada Tabel 5.99. Sehingga persamaan lebar retaknya adalah seperti terlihat pada Tabel 5.100.

Tabel 5. 100 Persamaan Lebar Retak Pelat HPFRC Dengan Konfigurasi Sebagai Elemen TPB

Pelat	Persamaan lebar retak
HPFRC-1	$w_{maks} = \frac{PL}{Ebh} (10,47 \xi - 19,55 \xi^2 + 3575,94 \xi^3 - 8950,8 \xi^4 + 5640,84 \xi^5)$
HPFRC-2	$w_{maks} = \frac{PL}{Ebh} (14,13 \xi - 14,58 \xi^2 + 3171,9 \xi^3 - 8028,0 \xi^4 + 5108,94 \xi^5)$
HPFRC-3	$w_{maks} = \frac{PL}{Ebh} (12,27 \xi + 73,76 \xi^2 - 2302,08 \xi^3 + 5028,6 \xi^4 - 2838,54 \xi^5)$
HPFRC-4	$w_{maks} = \frac{PL}{Ebh} (13,8 \xi + 121,36 \xi^2 - 4388,76 \xi^3 + 9672,0 \xi^4 - 5489,88 \xi^5)$

Hasil perhitungan lebar retak pelat HPFRC sebagai elemen lentur tiga titik (TPB) dapat dilihat pada Tabel 5.101.

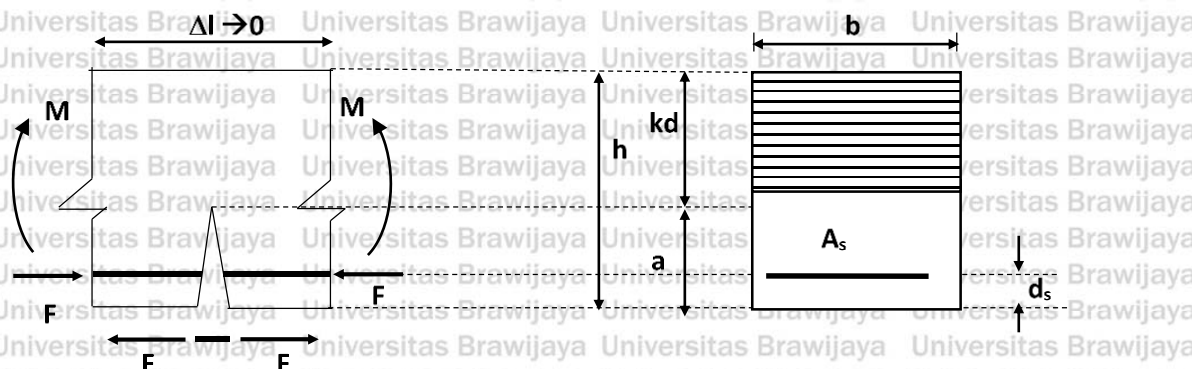
Tabel 5. 101 Prediksi Lebar Retak Maksimum Pelat HPFRC Sebagai Elemen TPB

Label	Kadar serat	Kuat Tekan (Mpa)	Saat retak awal		Saat baja leleh		Saat pelat runtuh	
			P_e	w_e	P_y	w_y	P_u	w_u
			(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)
HPFRC-1	0,4 %	54,35	14,350	0,057	-	-	29,381	0,165
HPFRC-2	0,6 %	55,49	11,903	0,063	-	-	30,562	0,230
HPFRC-3	0,8 %	60,68	18,769	0,083	32,887	0,206	33,794	0,239
HPFRC-4	1,0 %	67,67	19,759	0,084	33,126	0,215	33,400	0,233

5.9.11 Persamaan faktor intensitas tegangan dengan konfigurasi reaksi hiperstatik tulangan F dan momen lentur eksternal M (F&M) pada elemen pelat

Dalam analisis tradisional dari balok beton bertulang, bagian tarik beton diasumsikan tidak mendukung traksi sementara bagian tekan diasumsikan berperilaku elastis atau elasto-plastis. Analisis semacam itu tidak memperhitungkan variasi kekakuan dan konsentrasi tegangan karena adanya retakan. (Carpinteri, 1986). Terdapat lima kondisi yang berbeda yang menyebabkan terjadinya kolaps pada pelat beton bertulang: (1) perambatan retak dalam beton; (2) Runtuhnya kuat tarik beton; (3) Runtuh tekan beton; (4) baja leleh; (5) *slippage* pada batang baja.

Kita tinjau elemen balok beton bertulang dengan penampang persegi panjang lebar b dan ketebalan h , dikenakan momen lentur, M . Tulangan baja berada pada jarak d_s dari tepi bawah. Sebuah retak tepi melalui ketebalan pelat diasumsikan ada dalam posisi membentang seperti ditunjukkan pada Gambar 5.97. Oleh karena itu, segmen pelat beton retak seluruhnya akan dikenakan momen lentur eksternal M dan gaya aksial eksentrik F , karena reaksi hiperstatik tulangan. (*the external bending moment M and the eccentric axial force F , due to the hyperstatic reaction of the reinforcement*) atau disingkat F&M.

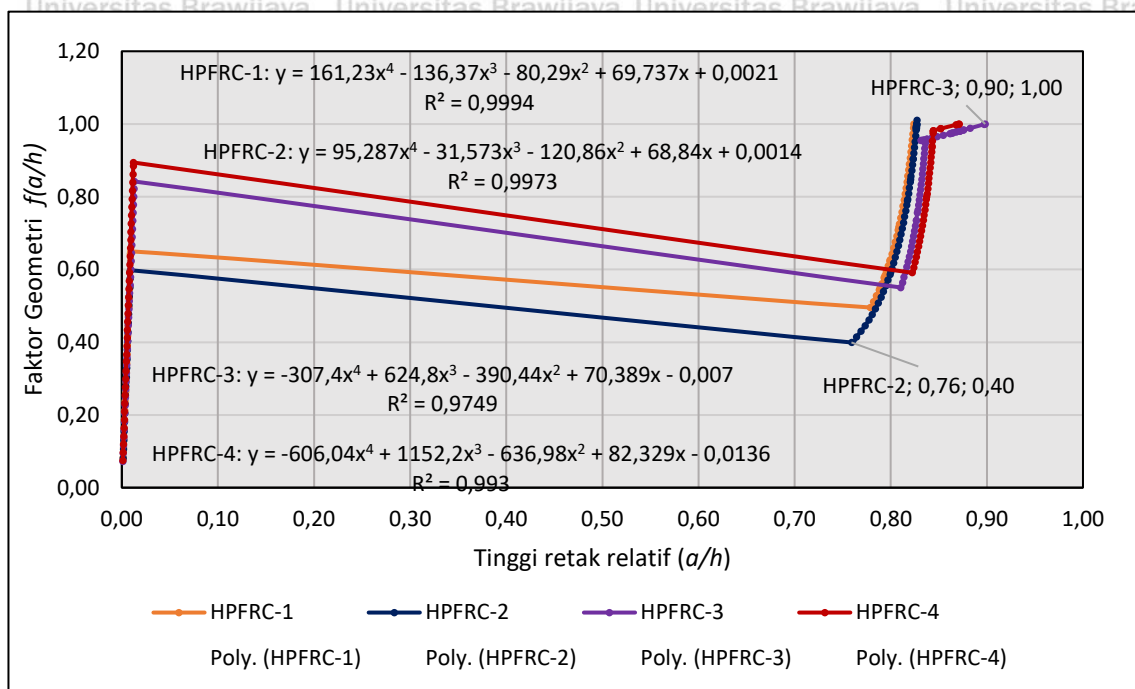


Gambar 5. 97 Elemen pelat HPFRC bertulangan baja yang telah retak

Telah diketahui bahwa momen lentur, M^* , menginduksi faktor intensitas tegangan pada ujung retakan sama dengan (Carpinteri, 1981):

$$K_I = \frac{M^*}{h^{3/2} b} Y_M(\xi) \quad (5-17)$$

dengan $\xi = a/h$ adalah kedalaman retak relatif dan $Y_M(\xi)$ adalah fungsi geometri untuk nilai ξ maksimal tertentu. Hasil analisis untuk keempat pelat HPFRC mendapatkan hubungan fungsi geometri dengan kedalaman retak relatif sebagaimana terlihat pada Gambar 5.98.



Gambar 5.98 Hubungan faktor geometri $Y_M(\xi)$ dengan kedalaman retak relatif (ξ)

Selanjutnya persamaan faktor intensitas tegangan dengan fungsi faktor geometrinya yang merupakan persamaan polinomial order 4 yang berasal dari persamaan $K_I = \sigma\sqrt{\pi a} f(\xi)$ akibat momen lentur $M^* = M - F\left(\frac{h}{2} - ds\right)$ adalah sebagaimana terlihat pada

Tabel 5.102.

Tabel 5.102 Persamaan Faktor Intensitas Tegangan (K_I) Pelat HPFRC

Pelat	Faktor intensitas tegangan : K_I
HPFRC-1	$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} [0,0021 + 69,737 \xi - 80,29 \xi^2 - 136,37 \xi^3 + 161,23 \xi^4]$
HPFRC-2	$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} [0,0014 + 68,84 \xi - 120,86 \xi^2 - 31,573 \xi^3 + 95,287 \xi^4]$
HPFRC-3	$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} [-0,007 + 70,389 \xi - 390,44 \xi^2 + 624,8 \xi^3 - 307,4 \xi^4]$
HPFRC-4	$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} [-0,0136 + 82,329 \xi - 636,98 \xi^2 + 1152,2 \xi^3 - 606,04 \xi^4]$

dan dengan substitusi persamaan tegangan $\sigma = 6M^*/bh^2$ maka persamaan pada Tabel 5.102 dapat ditulis menjadi Tabel 5.103.

Tabel 5. 103 Persamaan Faktor Intensitas Tegangan K_I

Pelat	Faktor intensitas tegangan : K_I
HPFRC-1	$K_I = \frac{M^*}{bh^{3/2}} [6(0,0037 \xi^{1/2} + 123,606 \xi^{3/2} - 142,31 \xi^{5/2} - 241,71 \xi^{7/2} + 285,773 \xi^{9/2})]$
HPFRC-2	$K_I = \frac{M^*}{bh^{3/2}} [6(0,0025 \xi^{1/2} + 122,016 \xi^{3/2} - 214,22 \xi^{5/2} - 55,962 \xi^{7/2} + 168,892 \xi^{9/2})]$
HPFRC-3	$K_I = \frac{M^*}{bh^{3/2}} [6(-0,0124 \xi^{1/2} + 124,761 \xi^{3/2} - 692,04 \xi^{5/2} + 1107,429 \xi^{7/2} - 544,852 \xi^{9/2})]$
HPFRC-4	$K_I = \frac{M^*}{bh^{3/2}} [6(-0,0241 \xi^{1/2} + 145,924 \xi^{3/2} - 1129,02 \xi^{5/2} + 2042,22 \xi^{7/2} - 1074,18 \xi^{9/2})]$

Sehingga persamaan faktor geometri $Y_M(\xi)$ menjadi seperti yang terlihat pada Tabel 5.104.

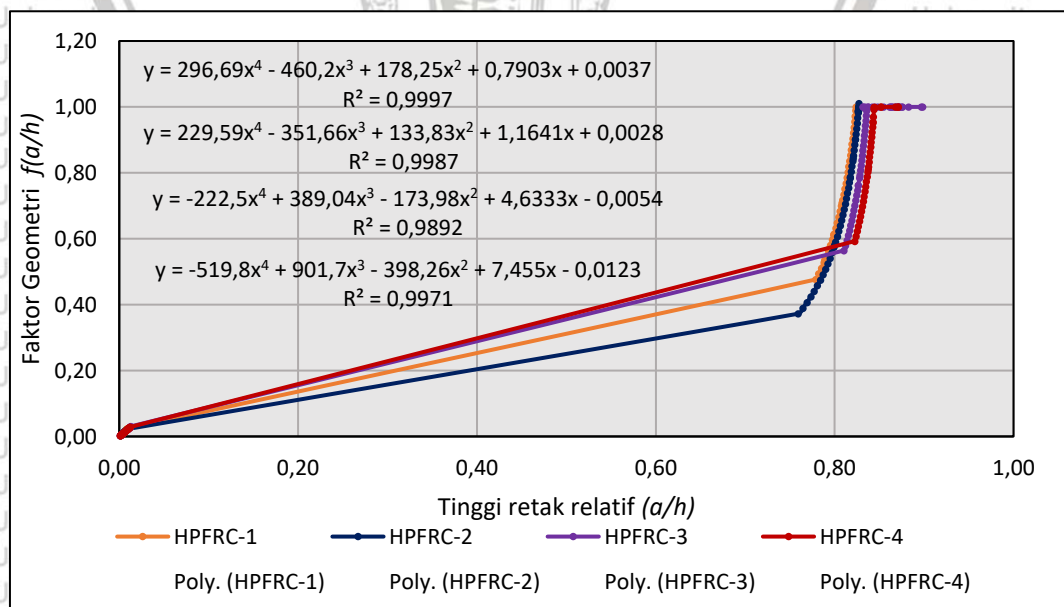
Tabel 5. 104 Persamaan Faktor Geometri $Y_M(\xi)$

Pelat	Faktor geometri : $Y_M(\xi)$
HPFRC-1	$Y_M(\xi) = 6 [0,0037 \xi^{1/2} + 123,606 \xi^{3/2} - 142,31 \xi^{5/2} - 241,71 \xi^{7/2} + 285,773 \xi^{9/2}]$
HPFRC-2	$Y_M(\xi) = 6 [0,0025 \xi^{1/2} + 122,016 \xi^{3/2} - 214,22 \xi^{5/2} - 55,962 \xi^{7/2} + 168,892 \xi^{9/2}]$
HPFRC-3	$Y_M(\xi) = 6 [-0,0124 \xi^{1/2} + 124,761 \xi^{3/2} - 692,04 \xi^{5/2} + 1107,429 \xi^{7/2} - 544,852 \xi^{9/2}]$
HPFRC-4	$Y_M(\xi) = 6 [-0,0241 \xi^{1/2} + 145,924 \xi^{3/2} - 1129,02 \xi^{5/2} + 2042,22 \xi^{7/2} - 1074,18 \xi^{9/2}]$

Dengan cara yang sama gaya aksial F^* , dapat diasosiasikan dengan faktor intensitas tegangan:

$$K_I = \frac{F^*}{h^{1/2} b} Y_F(\xi) \quad (5-18)$$

dengan $Y_F(\xi)$ adalah faktor geometri untuk nilai $\xi = a/h$ maksimal tertentu. Hasil analisis untuk keempat pelat HPFRC mendapatkan fungsi geometri seperti terlihat pada Gambar 5.99.

Gambar 5. 99 Hubungan faktor geometri $Y_F(\xi)$ dengan kedalaman retak relatif (ξ)

Untuk pelat HPFRC-3, persamaan faktor intensitas tegangan beserta fungsi faktor geometrinya yang merupakan persamaan polinomial order 4 yang berasal dari persamaan $K_I = \sigma\sqrt{\pi a} f(\xi)$ akibat gaya aksial F seperti pada Tabel 5.105.

Tabel 5. 105 Persamaan Faktor Intensitas Tegangan

Pelat	Faktor intensitas tegangan : K_I
HPFRC-1	$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} [0,0037 + 0,7903 \xi + 178,25 \xi^2 - 460,2 \xi^3 + 296,69 \xi^4]$
HPFRC-2	$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} [0,00282 + 1,1641 \xi + 133,83 \xi^2 - 351,66 \xi^3 + 229,59 \xi^4]$
HPFRC-3	$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} [-0,0054 + 4,6333 \xi - 173,98 \xi^2 + 389,04 \xi^3 - 222,5 \xi^4]$
HPFRC-4	$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} [-0,0123 + 7,455 \xi - 398,26 \xi^2 + 901,7 \xi^3 - 519,8 \xi^4]$

Tegangan yang bekerja diakibatkan oleh gaya aksial dengan persamaan $\sigma = \frac{F^*}{bh}$ sehingga persamaan faktor intensitas tegangan menjadi sebagaimana terlihat pada Tabel 5.106.

Tabel 5. 106 Faktor Intensitas Tegangan K_I

Pelat	Faktor geometri : $f(\xi)$
HPFRC-1	$K_I = \frac{F^*}{bh^{1/2}} [0,0066 \xi^{1/2} + 1,4 \xi^{3/2} + 315,94 \xi^{5/2} - 815,68 \xi^{7/2} + 525,87 \xi^{9/2}]$
HPFRC-2	$K_I = \frac{F^*}{bh^{1/2}} [0,0050 \xi^{1/2} + 2,06 \xi^{3/2} + 237,217 \xi^{5/2} - 623,3 \xi^{7/2} + 406,94 \xi^{9/2}]$
HPFRC-3	$K_I = \frac{F^*}{bh^{1/2}} [-0,0096 \xi^{1/2} + 8,21 \xi^{3/2} - 308,37 \xi^{5/2} + 689,56 \xi^{7/2} - 394,37 \xi^{9/2}]$
HPFRC-4	$K_I = \frac{F^*}{bh^{1/2}} [-0,0218 \xi^{1/2} + 13,21 \xi^{3/2} - 705,9 \xi^{5/2} + 1598,22 \xi^{7/2} - 921,32 \xi^{9/2}]$

dan faktor geometri $Y_F(\xi)$ adalah:

Tabel 5. 107 Faktor Geometri $Y_F(\xi)$ Pelat HPFRC

Pelat	Faktor geometri : $f(\xi)$
HPFRC-1	$Y_F(\xi) = 0,0066 \xi^{1/2} + 1,4 \xi^{3/2} + 315,94 \xi^{5/2} - 815,68 \xi^{7/2} + 525,87 \xi^{9/2}$
HPFRC-2	$Y_F(\xi) = 0,0050 \xi^{1/2} + 2,06 \xi^{3/2} + 237,217 \xi^{5/2} - 623,3 \xi^{7/2} + 406,94 \xi^{9/2}$
HPFRC-3	$Y_F(\xi) = -0,0096 \xi^{1/2} + 8,21 \xi^{3/2} - 308,37 \xi^{5/2} + 689,56 \xi^{7/2} - 394,37 \xi^{9/2}$
HPFRC-4	$Y_F(\xi) = -0,0218 \xi^{1/2} + 13,21 \xi^{3/2} - 705,9 \xi^{5/2} + 1598,22 \xi^{7/2} - 921,32 \xi^{9/2}$

5.9.12 Persamaan lebar retak elemen dengan reaksi hiperstatik tulangan F dan momen lentur eksternal M (F&M)

Penampang tidak retak dianggap sebagai sambungan jepit sempurna sebagaimana terlihat pada Gambar 5.100a. Sementara penampang retak adalah sambungan elastis yang berotasi akibat aksi momen lentur M dan gaya aksial F akibat reaksi hiperstatik tulangan sebagaimana terlihat pada Gambar 5.100b. Superposisi linier antara deformasi bukaan retak (COD) dengan notasi $\Delta\delta_{FF}$ pada titik dimana gaya F bekerja, dan, deformasi bukaan retak (COD) dengan notasi $\Delta\delta_{FM}$, yang disebabkan oleh momen lentur M , bisa ditulis sebagai persamaan lebar retak:

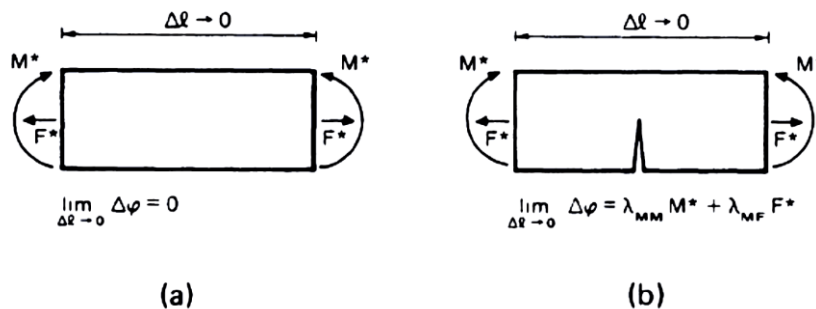
$$w = \delta_{FM} + \delta_{FF} = \lambda_{FM} M^* + \lambda_{FF} F^* \quad (5-19)$$

dengan, λ_{FM} dan λ_{FF} adalah *compliance* dari elemen akibat adanya retakan. Untuk sistem tidak tertentu secara statis pada Gambar 5.100, momen totalnya adalah:

$$M^* = M - F \left(\frac{h}{2} - kd \right) \quad (5-20)$$

Sedangkan gaya aksialnya adalah

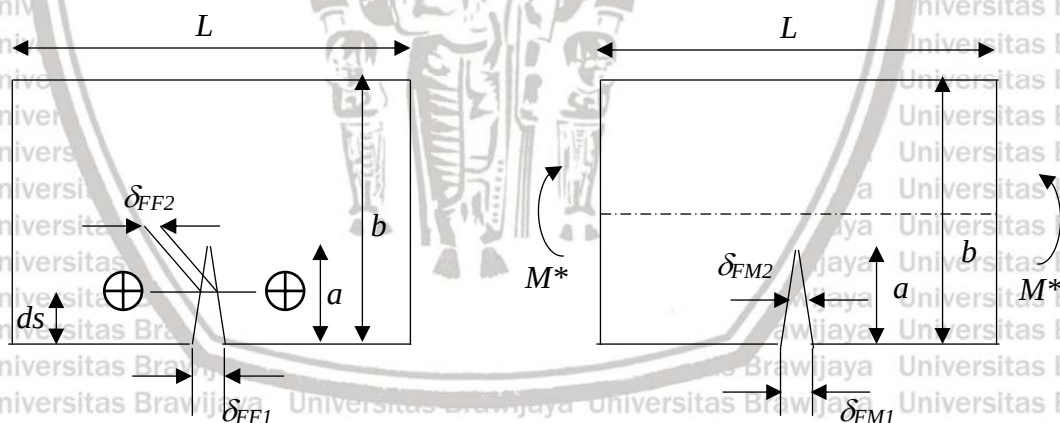
$$F^* = -F \quad (5-21)$$



Gambar 5. 100 Rotasi lokal pada penampang tidak retak (a) dan penampang retak (b) pada penampang melintang pelat HPRFC.

Sumber: (Carpinteri, 1986)

Gambar 5.101 memperlihatkan bukaan retak yang terjadi akibat reaksi tulangan F^* dan momen lentur M^*



Gambar 5. 101 Bukaan retak akibat reaksi tulangan dan momen

Sumber: (Tada et al., 2000)

a. Lebar retak maksimum akibat reaksi hiperstatik tulangan

Lebar retak pada ujung retakan yang dihitung sebagai perpindahan bukaan ujung retak dihitung dengan persamaan $CTOD = \frac{4}{\pi} \frac{K^2}{E \sigma_{ys}}$.. Sementara itu pada level tulangan, bukaan

retak dihitung dengan cara memasukkan nilai $x = 20$ mm ke dalam persamaan $COD =$

$\frac{4\sigma}{E} \sqrt{(a + r_p^*)^2 - x^2}$ atau: $COD = \frac{4\sigma}{E} \sqrt{a^2 + \frac{E^2}{16\sigma^2} (CTOD)^2 - x^2}$. Pada sisi terluar atau bagian bawah pelat HPFRC, bukaan retak maksimum (*crack opening at edge*) dihitung dengan persamaan $\delta_{FF} = COD_{max} = \frac{4\sigma}{E} \left[a + \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_{ys}^2} \right]$. Hasil perhitungan lebar retak akibat reaksi tulangan dapat dilihat pada Tabel 5.108.

Tabel 5. 108 Prediksi Lebar Retak Maksimum Akibat Reaksi Tulangan δ_{FF}

Label	Kadar serat	Kuat Tekan (Mpa)	Saat retak awal		Saat baja leleh		Saat pelat runtuh	
			P_e	w_e	P_y	w_y	P_u	w_u
			(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)
HPFRC-1	0,4 %	54,35	14,350	0,1474	-	-	29,381	0,3277
HPFRC-2	0,6 %	55,49	11,903	0,1148	-	-	30,562	0,3362
HPFRC-3	0,8 %	60,68	18,769	0,1992	32,887	0,3562	33,794	0,3916
HPFRC-4	1,0 %	67,67	19,759	0,1773	33,126	0,3103	33,400	0,3173

b. Lebar retak akibat momen eksternal pada sisi terluar

Lebar retak pada ujung retakan yang dihitung sebagai perpindahan bukaan ujung retak dihitung dengan persamaan $CTOD = \frac{4}{\pi} \frac{K^2}{E \sigma_{ys}}$.. Sementara itu pada level tulangan, bukaan retak dihitung dengan cara memasukkan nilai $x = 20$ mm ke dalam persamaan $COD = \frac{4\sigma}{E} \sqrt{(a + r_p^*)^2 - x^2}$ atau: $COD = \frac{4\sigma}{E} \sqrt{a^2 + \frac{E^2}{16\sigma^2} (CTOD)^2 - x^2}$. Pada sisi terluar atau bagian bawah pelat HPFRC, bukaan retak maksimum (*crack opening at edge*) dihitung dengan persamaan $\delta_{FM} = COD_{max} = \frac{4\sigma}{E} \left[a + \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_{ys}^2} \right]$. Hasil perhitungan lebar retak akibat momen dapat dilihat pada Tabel 5.109.

Tabel 5. 109 Prediksi Lebar Retak Maksimum Akibat Momen δ_{FM}

Label	Kadar serat	Kuat Tekan (Mpa)	Saat retak awal		Saat baja leleh		Saat pelat runtuh	
			P_e	w_e	P_y	w_y	P_u	w_u
			(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)
HPFRC-1	0,4 %	54,35	14,350	0,0206	-	-	29,381	0,0633
HPFRC-2	0,6 %	55,49	11,903	0,0163	-	-	30,562	0,0650
HPFRC-3	0,8 %	60,68	18,769	0,0280	32,887	0,065	33,794	0,0750
HPFRC-4	1,0 %	67,67	19,759	0,0250	33,126	0,0611	33,400	0,0640

Selanjutnya lebar retak maksimum dapat dihitung sebagai selisih lebar retak akibat momen dengan lebar retak akibat reaksi tulangan dengan persamaan $w_{maks} = -\delta_{FM} + \delta_{FF}$ sebagaimana terlihat pada Tabel 5.110.

Tabel 5. 110 Prediksi Lebar Retak Maksimum w_{maks} Akibat Reaksi Tulangan F^* dan Momen M^*

Label	Kadar serat	Kuat Tekan (Mpa)	Saat retak awal		Saat baja leleh		Saat pelat runtuh	
			P_e	w_e	P_y	w_y	P_u	w_u
			(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)
HPFRC-1	0,4 %	54,35	14,350	0,1267	-	-	29,381	0,2644
HPFRC-2	0,6 %	55,49	11,903	0,0985	-	-	30,562	0,2712
HPFRC-3	0,8 %	60,68	18,769	0,1713	32,887	0,3003	33,794	0,3264
HPFRC-4	1,0 %	67,67	19,759	0,1524	33,126	0,2492	33,400	0,2533

5.10 Validasi Persamaan Lebar Retak Pelat HPFRC Satu Arah

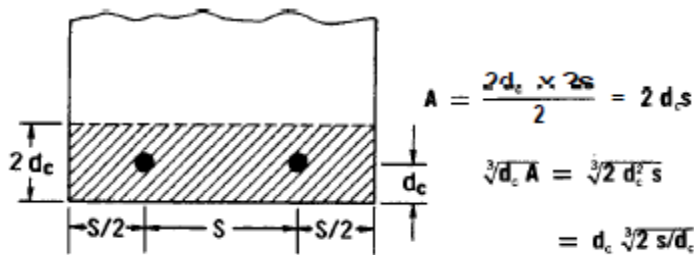
5.10.1 Prediksi lebar retak maksimum berdasar ACI 318-14 dan ACI 224.2R-92

Lebar retak maksimum dapat diperkirakan dengan mengalikan jarak retak maksimum (4 kali selimut beton) pada tegangan baja tinggi dengan regangan rata-rata dalam tulangan (ACI 224.2R-92, 1997). Ketika membahas elemen tarik dengan lebih dari satu batang tulangan, penutup beton sebenarnya bukanlah variabel yang paling tepat. Sebagai gantinya, selimut beton efektif t_e digunakan. t_e didefinisikan sebagai fungsi dari jarak tulangan, sebagaimana penutup beton diukur ke pusat tulangan. Semakin besar jarak tulangan, semakin besar lebar retak. Ini tercermin melalui meningkatnya penutup efektif. Penutup beton yang efektif adalah:

$$t_e = d_c \sqrt{1 + \left(\frac{s}{4d_c}\right)^2} \quad (5-22)$$

dengan d_c = jarak dari pusat batang tulangan ke serat tegangan tarik ekstrim (mm) dan s = jarak tulangan (mm). Variabel t_e serupa dengan variabel $\sqrt[3]{d_c A}$ yang digunakan pada persamaan lebar retak untuk elemen lentur oleh Gergely-Lutz. A adalah luas beton simetris dengan tulangan baja dibagi menjadi jumlah batang (mm^2). Karena besarnya variabilitas lebar retak pada elemen tarik, lebar retak maksimum pada tarik langsung diperkirakan lebih besar dibanding lebar retak maksimum untuk lentur dengan tegangan baja yang sama.

Lebih besarnya lebar retak pada elemen tarik bisa disebabkan karena kurangnya penahanan retak yang ditimbulkan oleh daerah tekan pada elemen lentur. Gradien tegangan pada elemen lentur menyebabkan retak dimulai pada lokasi dengan tegangan yang lebih tinggi dan berkembang secara gradual dibanding dengan elemen tarik yang tegangannya seragam.



Gambar 5.102 Parameter $\sqrt[3]{d_c A}$ dalam pengertian jarak antara batang tulangan

Persamaan yang diusulkan pada versi awal ACI 318-95 memiliki bentuk (ACI 224.2R-92, 1997):

$$w_{maks} = 0,011 \cdot 10^{-3} \beta f_s \sqrt[3]{d_c A_0} \text{ (mm)} \quad (5-23)$$

Dengan

$\beta = \frac{h-x}{d-x}$ = perbandingan antara jarak antara sumbu netral dan permukaan tarik ekstrem terhadap jarak antara sumbu netral dan pusat baja tulangan.

A_0 = luas beton disekitar batang tulangan tunggal = A_e/n_b . $A_0 = A_e/n_b$

A_e = luas efektif beton tarik. A_e dapat didefinisikan sebagai luasan balok beton dengan lebar sepenuhnya dan pusat tulangan utama yang sama. $A_e = 2 d_c b$.
 n_b = jumlah tulangan tarik.

d_c = jarak terukur dari pusat batang tarik menuju serat tarik terluar.

f_s = tegangan baja pada penampang retak

x = jarak terukur dari garis netral ke serat tekan terluar.

Spasi tulangan terdekat ke muka tarik, s , tidak boleh melebihi yang diberikan oleh (ACI 318M-14, 2014).

$$s = 380 \left(\frac{280}{f_s} \right) - 2.5 c_c \leq 300 (280/f_s) \quad (5-24)$$

Data yang diketahui dalam analisis lebar retak pelat HPERC yang dianalisis mengikuti ketentuan dalam ACI 318 dan ACI 224.2R-92 dapat dilihat pada Tabel 5.111.

Tabel 5. 111 Parameter Dalam Analisis Lebar Retak menurut ACI 224.2R-92

Pelat	b	h	d	d_c	A_e	n_b	A_o
	mm	mm	mm	mm	mm ²	buah	mm ²
HPFRC-1	900	80	60	20	36.000	7	5.142,86
HPFRC-2	900	80	60	20	36.000	7	5.142,86
HPFRC-3	900	80	60	20	36.000	7	5.142,86
HPFRC-4	900	80	60	20	36.000	7	5.142,86

Sedangkan perhitungan lebar retak untuk kondisi retak pertama, retak saat tulangan leleh dan saat pelat runtuh dapat dilihat pada Tabel 5.112.

Tabel 5. 112 Prediksi Lebar Retak Maksimum Menurut ACI 318 Dan ACI 224.2R

Pelat	Kondisi	kd	β	f_s	Beban P	a/h	w_{maks}
		mm	mm/mm	MPa	kN	mm/mm	mm
HPFRC-1	Retak I	11.414	1.412	196.252	14.350	0.779	0.143
	Runtuh	11.072	1.409	412.073	29.381	0.824	0.299
HPFRC-2	Retak I	11.658	1.414	159.585	11.903	0.759	0.116
	Runtuh	10.973	1.408	428.488	30.562	0.827	0.311
HPFRC-3	Retak I	10.588	1.405	259.239	18.769	0.810	0.188
	Leleh	10.448	1.404	459.370	32.887	0.838	0.332
	Runtuh	7.055	1.378	459.370	33.794	0.898	0.326
HPFRC-4	Retak I	10.034	1.400	272.212	19.759	0.822	0.196
	Leleh	9.582	1.397	459.370	33.126	0.852	0.331
	Runtuh	8.531	1.389	459.370	33.400	0.871	0.329

5.10.2 Prediksi lebar retak maksimum berdasar Eurocode 2-2014

Lebar retak adalah perbedaan perpanjangan antara baja dan beton dengan jarak $2l_t$, di mana l_t adalah "panjang transmisi" yang diperlukan untuk meningkatkan kekuatan beton dari 0 hingga mencapai kuat tarik f_{ctm} . Jarak maksimum antara dua celah harus $2l_t$, kalau tidak retakan baru dapat terjadi di antara keduanya. Persamaan lebar retak menurut (Eurocode 2. 2014) adalah

$$w_k = s_{r.maks} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (5-25)$$

$s_{r.maks}$ = jarak retakan maksimum

$$s_{r.maks} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 \frac{\phi}{\rho_{p.eff}} \quad (5-26)$$

dengan

c = selimut beton

ϕ = diameter tulangan

k_1 = factor lekatan (0,8 untuk bilah tinggi, 1,6 untuk bilah dengan permukaan polos yang efektif, misalnya tendon prategang)

k_2 = adalah koefisien distribusi regangan (1,0 untuk tegangan dan 0,5 untuk pembengkokan; nilai antara dapat digunakan)

k_3 = dianjurkan dengan nilai 3,4 dan

k_4 = direkomendasikan dengan nilai 0,425

$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$ = perbedaan deformasi antara baja dan beton pada saat retakan maksimum dengan persamaan:

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{f_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}}}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (5-27)$$

dengan

f_s = tegangan tarik baja pada bagian yang retak

$\rho_{p,eff} = \frac{A_{st}}{bh_{c,ef}}$ = rasio tulangan efektif

k_t = faktor yang tergantung pada durasi pembebanan (0,6 untuk jangka pendek dan 0,4 untuk jangka panjang).

Untuk struktur lentur diperlukan istilah ketinggian batang tarik efektif $h_{c,ef}$ yang diambil nilai minimum dari 2,5 ($h - d$) atau $(h - x)/3$ atau $h/2$.

Dengan demikian persamaan lebar retak menurut *Eurocode 2: Background & Applications Design Of Concrete Buildings* (Eurocode 2, 2014) adalah sebagai berikut:

$$w_k = \left(3,4c + 0,8x0,5x0,425 \frac{\phi}{\rho_{eff}} \right) \frac{\left(f_s - k_t \left(\frac{f_{ct,eff}}{\rho_{eff}} \right) \right)}{E_s} \quad (5-28)$$

dengan tinggi efektif $h_{c,ef}$ adalah minimum dari: 2,5 ($h-ds$) atau $(h-kd)/3$ atau $h/2$ serta Nilai

$\frac{f_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}}}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}$. Parameter yang diketahui untuk keempat pelat HPFRC adalah:

Tabel 5. 113 Parameter Dalam Analisis Lebar Retak menurut Eurocode 2-2014

Pelat	c	f	A_{st}	b	d	kd	k_t
	mm	mm	mm ²	mm	mm	mm	mm
HPFRC-1	20	10	549,8	900	60	11,07	0,60
HPFRC-2	20	10	549,8	900	60	10,97	0,60
HPFRC-3	20	10	549,8	900	60	7,21	0,60
HPFRC-4	20	10	549,8	900	60	8,54	0,60

Hasil analisis lebar retak menurut Eurocode 2-2014 untuk keempat pelat HPFRC adalah seperti tertuang dalam Tabel 5.114.

Tabel 5. 114 Prediksi Lebar Retak Maksimum menurut Eurocode 2-2014

Pelat	Kondisi	Beban	$h_{c,ef}$	$\rho_{p,eff}$	$S_{r,maks}$	$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$	$\geq 0,6 \sigma_s/E_s$	w_k
		P	mm		mm	-	-	mm
HPFRC-1	Retak awal	14,350	22,862	0,027	131,623	0,0002	0,0006	0,027
	Pelat runtuh	29,381	22,976	0,027	131,941	0,0013	0,0012	0,169
HPFRC-2	Retak awal	11,903	22,781	0,027	131,397	0,0000	0,0005	0,002
	Pelat runtuh	30,562	23,009	0,027	132,033	0,0014	0,0013	0,179
HPFRC-3	Retak awal	18,769	23,137	0,026	132,390	0,0005	0,0008	0,062
	Baja leleh	32,887	23,184	0,026	132,520	0,0015	0,0014	0,195
	Pelat runtuh	33,794	24,315	0,025	135,667	0,0014	0,0014	0,194
HPFRC-4	Retak awal	19,759	23,322	0,026	132,903	0,0005	0,0008	0,063
	Baja leleh	33,126	23,473	0,026	133,323	0,0014	0,0014	0,188
	Pelat runtuh	33,400	23,823	0,026	134,298	0,0014	0,0014	0,188

5.10.3 Prediksi lebar retak maksimum berdasar AS-3600-2000

Teori klasik yang menggambarkan perkembangan retak pada elemen beton dengan tulangan memanjang yang ditempatkan konsentris pada penampang melintangnya dan dibebani gaya tertentu pada kedua ujungnya, dapat digunakan sebagai dasar menurunkan persamaan untuk memprediksi lebar retak.

Pada saat tulangan baja dibebani hingga terjadi tegangan tarik, akan terjadi kerusakan ikatan antara tulangan baja dan beton dekat ujung elemen. Distribusi regangan seragam diasumsikan berkembang, sedangkan slip antara baja dan beton tetap bernilai nol. Retakan pertama akan terbentuk pada bagian terlemah dari wilayah regangan seragam ketika kuat tarik beton tercapai, dengan asumsi bahwa kapasitas tarik tulangan baja melebihi beton. Jika kapasitas tariknya sama disebut sebagai keadaan baja kritis. Jika tidak, tulangan baja akan gagal akibat tegangan tarik sebelum beton retak.

Sama seperti pada kedua ujung elemen beton bertulang, gaya pada baja tulangan pada retakan sama dengan beban yang bekerja, sementara beton tidak bertegangan di permukaan retakan. Juga terjadi slip dan tegangan lekat τ yang berkembang antara beton dan tulangan baja sesuai panjang transfer l_{tr} setiap sisi retak. Dengan ikatan itulah tegangan ditransfer ke beton.

Tergantung pada panjang keseluruhan elemen yang terkait dengan panjang transfer, retakan lain dapat terbentuk pada beban yang sedikit lebih tinggi. Secara teoritis, jarak antara retak yang terbentuk berdekatan satu sama lain tidak boleh kurang dari l_{tr} dan juga tidak bisa melebihi $2 l_{tr}$. Dengan demikian, dapat ditulis bahwa:

$$S_{cr,min} = l_{tr} \quad (5-29)$$

$$s_{cr.maks} = 2 l_{tr} \quad (5-30)$$

Jika diikuti dari kesetimbangan gaya longitudinal yang jika τ_m adalah rata-rata tegangan ikat pada panjang penyaluran l_{tr} , f_t adalah kuat tarik beton, dan Σ_0 adalah keliling batang baja,

maka:

$$l_{tr} = \frac{A_c f_t}{\tau_m \Sigma_0} \quad (5-31)$$

Substitusi perimeter batang $\Sigma_0 = 4 A_{st}/d_b$ dan rasio tulangan untuk tegangan Tarik $\rho_s = A_{st}/A_c$, dapat diikuti bahwa:

$$l_{tr} = \frac{d_b f_t}{4 \tau_m \rho_s} \quad (5-32)$$

Dan dari persamaan (5-30) dan (5-32), jarak retak maksimum menjadi:

$$s_{cr.maks} = \frac{d_b f_t}{2 \tau_m \rho_s} \quad (5-33)$$

Akhirnya, lebar retak sama dengan perpanjangan baja antara dua retakan terbuka dikurangi perpanjangan beton dan ditulis sebagai:

$$w_{maks} = s_{cr.maks} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (5-34)$$

Dimana ε_{sm} dan ε_{cm} adalah rata-rata regangan baja dan beton pada panjang transisi l_{tr} .

Pada akhir Panjang transisi, batang baja sepenuhnya terikat pada beton, dan gaya Tarik dalam baja pada lokasi ini T'_b diberikan oleh:

$$T'_b = T_b \frac{n \rho_s}{1+n \rho_s} \quad (5-35)$$

Dimana T_b adalah gaya tarik batang pada bagian yang retak. Asumsikan tegangan lekat seragam pada panjang transisi l_{tr} yang diikuti regangan rata-rata pada batang baja ε_{sm} diberikan oleh:

$$\varepsilon_{sm} = \frac{1}{2 E_s} \left[\frac{T_b}{A_{st}} + \frac{T'_b}{A_{st}} \right] \quad (5-36)$$

Dan dari persamaan (5-35), diketahui bahwa.

$$\varepsilon_{sm} = \frac{f_s}{2 E_s} \left[\frac{1+2 n \rho_s}{1+n \rho_s} \right] \quad (5-37)$$

Dimana $f_s = T_b/A_{st}$

Dari persamaan (5-37) dapat dilihat bahwa regangan baja rata-rata ε_{sm} adalah fungsi dari rasio tulangan $\rho_s = A_{st}/A_c$. Nilai ε_{sm} meningkat seiring dengan ρ_s . Dalam praktek, pernyataan dalam kurung di persamaan (4-109) dapat mencapai nilai maksimum sekitar 1.3.

Oleh karena itu, estimasi untuk ε_{sm} adalah $0.65 f_s/E_s$. Jika perpanjangan beton diabaikan,

maka $\varepsilon_{sm} = 0$, sehingga perkiraan rumusan untuk lebar retak w_{maks} dapat ditulis menggunakan persamaan (5-35) dan (5-37):

$$w_{maks} = s_{cr.maks} \frac{0.65 f_s}{E_s} \quad (5-38)$$

Substitusikan persamaan (5-34) ke dalam persamaan (5-38) untuk mendapatkan:

$$w_{maks} = \frac{d_b f_t}{2 \tau_m \rho_s} \frac{0.65 f_s}{E_s} \quad (5-39)$$

Persamaan ini menunjukkan jika diameter batang tulangan d_b meningkat, tegangan baja f_s pada penampang retak secara proporsional menurun apabila lebar retak maksimum tidak berubah.

Persamaan (5-39) untuk lebar retak maksimum dapat diperhalus dengan memasukkan kondisi regangan beton. Pada penampang belum retak, dapat ditulis bahwa:

$$f_c = \frac{f_s \rho_s}{(1+n \rho_s)} \quad (5-40)$$

Dimana f_c adalah tegangan tarik dalam beton, yang memiliki nilai maksimum f_t sehingga:

$$f_s = \frac{f_t (1+n \rho_s)}{\rho_s} \quad (5-41)$$

Selanjutnya diasumsikan bahwa tegangan lekat τ adalah seragam atau konstan pada panjang transisi. Sehingga dapat ditulis:

$$\varepsilon_{cm} = \frac{1}{2} \varepsilon_c = \frac{1}{2} \varepsilon_s = \frac{1}{2} \frac{f_s}{E_s} \quad (5-42)$$

Sesuai persamaan (5-41) menjadi:

$$\varepsilon_{cm} = \frac{1}{2} \frac{f_t (1+n \rho_s)}{\rho_s E_s} \quad (5-43)$$

Selanjutnya pengaruh dari susut beton dimasukkan, sehingga:

$$\varepsilon_{cm} = \frac{1}{2} \frac{f_t (1+n \rho_s)}{\rho_s E_s} - \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_{cs}}{(1+n \rho_s)} \quad (5-44)$$

Dimana ε_{cm} adalah regangan susut bebas dari beton dan bernilai negatif. Mengacu persamaan (5-36) dan (5-44) maka persamaan (5-39) dapat ditulis secara lebih umum sebagai:

$$w_{maks} = \frac{d_b f_t}{2 \tau_m \rho_s} \left(\frac{0.65 f_s}{E_s} - \frac{1}{2} \frac{f_t (1+n \rho_s)}{\rho_s E_s} - \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_{cs}}{(1+n \rho_s)} \right) \quad (5-45)$$

dengan

w_{maks} = lebar retak maksimum

d_b = nominal diameter tulangan

f_t = tegangan tarik beton (*the tensile strength of concrete*), diasumsikan sebesar 3.0 MPa

τ_m = rata-rata tegangan lekat (*bond stress*) sepanjang panjang penyaluran l_{tr} .

$$l_{tr} = \frac{A_c f_t}{\tau_m \Sigma_0} = \frac{d_b f_t}{4 \tau_m \rho_s} = \text{Panjang penyaluran}$$

Σ_0 = perimeter (keliling) batang tulangan

$\rho_s = A_{st}/A_c$ = rasio tulangan Tarik

A_c = Luas penampang melintang beton (tidak termasuk tulangan)

A_{st} = Luas penampang melintang tulangan tarik

f_s = tegangan baja pada penampang retak

E_s = Modulus elastisitas baja tulangan

E_c = Modulus elastisitas beton

ε_{cs} = Regangan akibat shrinkage beton

$n = E_s/E_c$ = modular ratio

Pada kasus retakan tunggal, untuk menghitung lebar retak, w , dirumuskan dengan asumsi tegangan lekat konstan. Mula-mula, serupa dengan persamaan (5-36) dapat ditulis bahwa:

$$w = 2 l_{tr} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (5-46)$$

Selanjutnya diikuti dari persamaan (5-34) dan (5-42) bahwa persamaan (5-46) menjadi:

$$w = \frac{d_b f_s}{2 \tau_m} \frac{1}{(1+n\rho_s)} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (5-47)$$

Rata-rata regangan baja, ε_{sm} , diberikan oleh persamaan (5-38), sementara rata-rata regangan beton, ε_{cm} , dapat ditunjukkan sama dengan

$$\varepsilon_{cm} = \frac{f_s}{2E_s} \frac{n\rho_s}{(1+n\rho_s)} \quad (5-48)$$

Substitusi persamaan (5-38) dan (5-48) ke dalam persamaan (5-47) menghasilkan:

$$w = \frac{d_b f_s}{2 \tau_m} \frac{1}{(1+n\rho_s)} \left(\frac{f_s}{2E_s} \right) \quad (5-49)$$

Seperti persamaan (5-45), pengaruh dari susut beton dapat dimasukkan hingga menghasilkan:

$$w = \frac{d_b f_s}{2 \tau_m} \frac{1}{(1+n\rho_s)} \left(\frac{f_s}{2E_s} - \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_{cs}}{(1+n\rho_s)} \right) \quad (5-50)$$

Analisis lebar retak maksimum berdasarkan AS 3600-2000 mengacu pada persamaan

$$(5.50) w_{maks} = \frac{d_b f_t}{2 \tau_m \rho_s} \left(\frac{0.65 f_s}{E_s} - \frac{1}{2} \frac{f_t (1+n\rho_s)}{\rho_s E_s} - \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_{cs}}{(1+n\rho_s)} \right) \text{ tanpa memperhitungkan susut}$$

beton. Untuk pelat dengan $b = 900$ mm, $h = 80$ mm, diameter tulangan $d_b = 10$ mm, luas tulangan $A_{st} = 549,78$ mm², luas penampang pelat $A_c = 72.000$ mm, maka data yang dipergunakan dalam analisis lebar retak ini adalah sebagaimana terlihat pada Tabel 5.115.

Tabel 5. 115 Parameter Analisis Lebar Retak menurut AS 3600-2000

Kondisi	d_b	f_t	τ_m	A_{st}	b	h	A_c	ρ_s	E_s
	mm	MPa	Mpa	mm ²	mm	mm	mm ²		Mpa
HPFRC-1	10,00	3,00	5,46	549,78	900,00	80,00	72000,00	0,01	199182,32
HPFRC-2	10,00	3,00	5,32	549,78	900,00	80,00	72000,00	0,01	199182,32
HPFRC-3	10,00	3,00	6,39	549,78	900,00	80,00	72000,00	0,01	199182,32
HPFRC-4	10,00	3,00	7,09	549,78	900,00	80,00	72000,00	0,01	199182,32

Dengan persamaan (5-50), lebar retak maksimum masing-masing pelat HPFRC pada saat terjadi kegagalan lentur dapat dilihat pada tabel 5.116.

Tabel 5. 116 Prediksi Lebar Retak Maksimum menurut AS 3600-2000

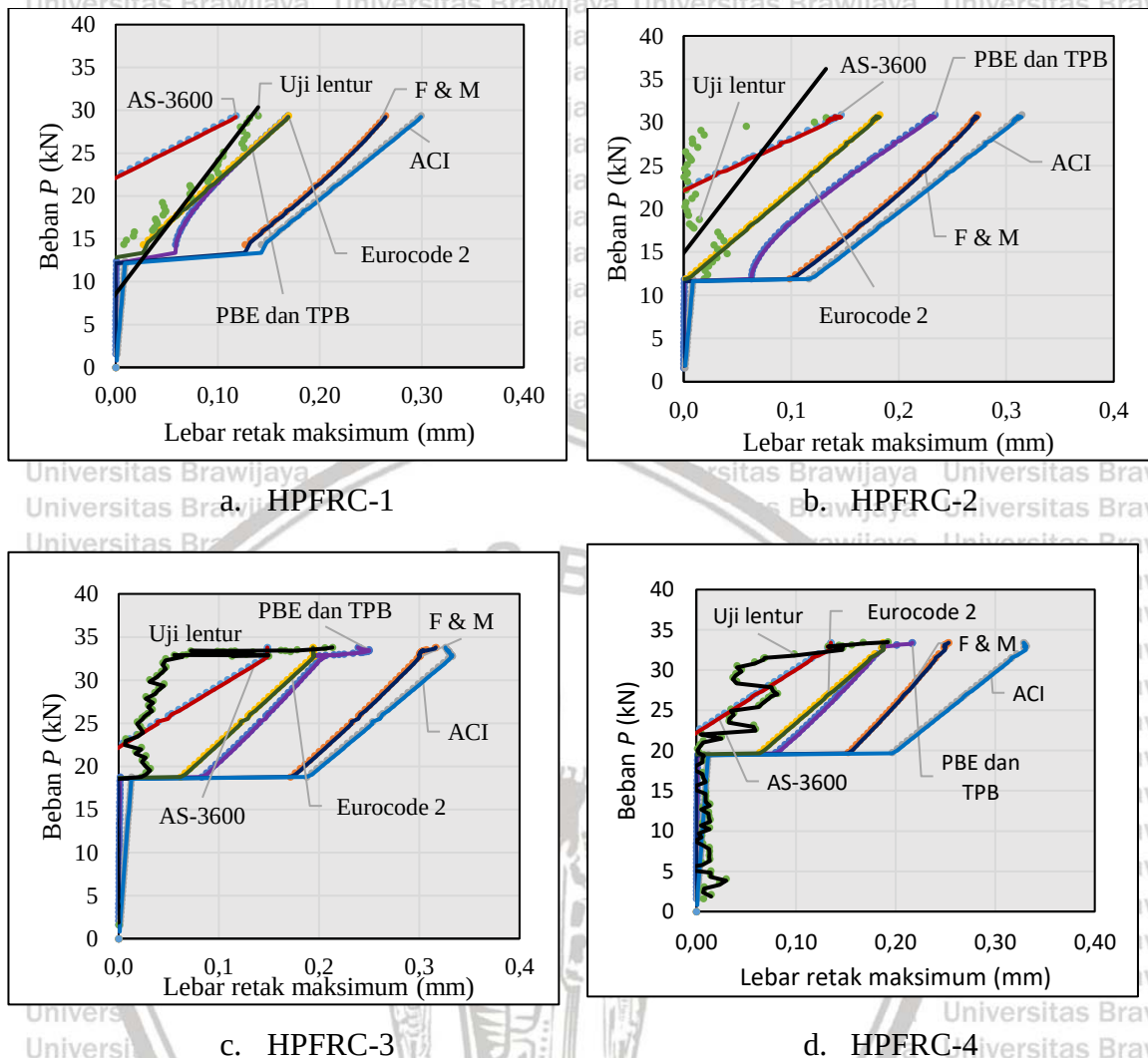
PELAT	Kondisi	E_c	n	f_s	w_{maks}	I_{tr}	Beban P	a/h
		MPa		MPa	mm	mm	kN	-
HPFRC-1	Retak awal	48179,85	4,13	316,63	0,006	179,95	22,69	0,813
	Pelat runtuh	48179,85	4,13	412,07	0,118	179,95	29,38	0,824
HPFRC-2	Retak awal	48947,40	4,07	316,42	0,006	184,65	22,70	0,814
	Pelat runtuh	48947,40	4,07	428,49	0,141	184,65	30,56	0,827
HPFRC-3	Retak awal	50061,00	3,98	315,26	0,004	153,67	22,70	0,822
	Baja leleh	50061,00	3,98	459,37	0,148	153,67	32,89	0,838
	Pelat runtuh	50061,00	3,98	459,37	0,148	153,67	33,79	0,898
HPFRC-4	Retak awal	58365,38	3,41	313,85	0,003	138,53	22,70	0,830
	Baja leleh	58365,38	3,41	459,37	0,135	138,53	33,13	0,852
	Pelat runtuh	58365,38	3,41	459,37	0,135	138,53	33,40	0,871

5.10.4 Perbandingan hasil analisis dan pengujian lebar retak

Pada bagian ini, lebar retak maksimum hasil analisis metode *Linear Elastic Fracture Mechanics* (LEFM) dengan tiga macam konfigurasi pelat HPFRC, yaitu konfigurasi *pure bending element* (PBE), konfigurasi *three point bending element* (TPB) dan konfigurasi reaksi hiperstatik tulangan F dan momen lentur M (F&M) dibandingkan dengan hasil analisis menggunakan persamaan lebar retak maksimum menurut ACI 318-14 atau ACI 224.2R-92, Eurocode 2-2014, dan Australian Standard AS 3600-2000 serta lebar retak maksimum hasil uji lentur pelat yang mempergunakan LVDT dan *strain-gauge* baja di laboratorium (selanjutnya disebut hasil uji lentur). Di samping itu juga ditinjau lebar retak yang diperoleh dari hasil analisis tegangan lekat dan *slip* (*bond-stress* dan *bond-slip*) pada saat menghitung gaya dalam akibat beban layan yang bekerja (selanjutnya disebut hasil analisis slip).

Perkembangan lebar retak maksimum yang terjadi pada masing-masing pelat HPFRC dapat digambarkan melalui hubungan lebar retak dengan beban eksternal P seperti terlihat pada Gambar 5.103. Sesudah retak pertama terjadi, lebar retak maksimum pelat HPFRC akan berperilaku linier hingga terjadinya leleh baja tulangan atau pelat runtuh. Sesudah baja

tulangan mencapai kekuatan lelehnya, pada pelat HPFRC-3 dan pelat HPFRC-4, lebar retak maksimum akan membesar meskipun beban tidak lagi meningkat



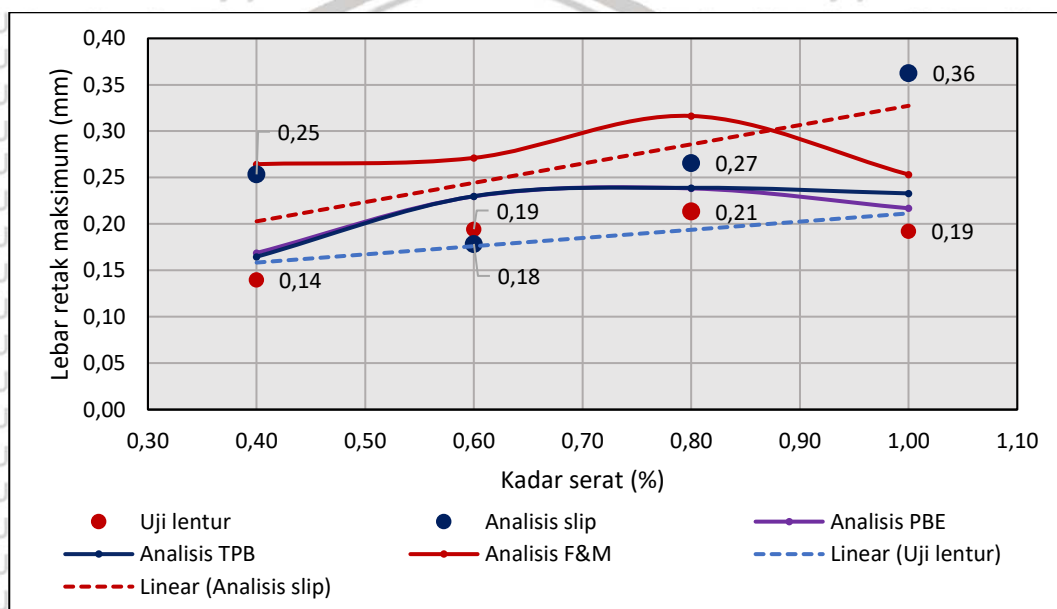
Gambar 5. 103 Hubungan lebar retak maksimum dengan beban eksternal P masing-masing pelat hasil pengujian lentur dan dari hasil analisis

Tabel 5.117 memperlihatkan lebar retak maksimum yang terjadi pada saat pelat HPFRC mengalami kegagalan lentur. Hasil ini diperoleh dari metode analisis LEFM dengan tiga macam konfigurasi pelat HPFRC (PBE, TPB dan F&M), tiga peraturan beton (ACI 318 atau ACI 224.2R, Eurocode 2-2014, dan AS 3600-2000), dan hasil eksperimen berupa uji lentur yang menggunakan LVDT dan *strain gauge* baja (hasil uji lentur), serta hasil perhitungan kumulatif panjang *slip* (hasil analisis slip). Dari data lebar retak maksimum pada saat terjadi keruntuhan pelat HPFRC tersebut, dapat dilakukan perbandingan hasil masing-masing analisis, untuk mengetahui hubungan antara hasil perhitungan masing-masing metode analisis lebar retak maksimum, juga hubungannya dengan hasil eksperimen pelat HPFRC.

Tabel 5. 117 Lebar Retak Maksimum (w_{maks}) saat pelat HPFRC runtuh

Pelat	Analisis				Code		Eksperimen	
	PBE	TPB	F&M	ACI	Eurocode 2	AS-3600	Uji lentur	Analisis Slip
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
HPFRC-1	0.169	0.165	0.264	0.299	0.169	0.118	0.140	0.253
HPFRC-2	0.230	0.230	0.271	0.311	0.179	0.141	0.194	0.179
HPFRC-3	0.238	0.239	0.316	0.326	0.194	0.148	0.213	0.266
HPFRC-4	0.217	0.233	0.253	0.329	0.188	0.135	0.192	0.363

Gambar 5.104 memperlihatkan perbandingan antara lebar retak maksimum hasil eksperimen pelat HPFRC dengan ketiga hasil analisis menggunakan metode *Linear Elastic Fracture Mechanic* (LEFM).



Gambar 5. 104 Perbandingan lebar retak maksimum hasil eksperimen terhadap hasil analisis menggunakan metode LEFM

Apabila rata-rata hasil perhitungan lebar retak maksimum dengan ketiga macam konfigurasi metode LEFM dibagi dengan hasil perhitungan lebar retak maksimum dari hasil eksperimen, prosentase yang diperoleh dapat ditabelkan seperti terlihat pada Tabel 5.118.

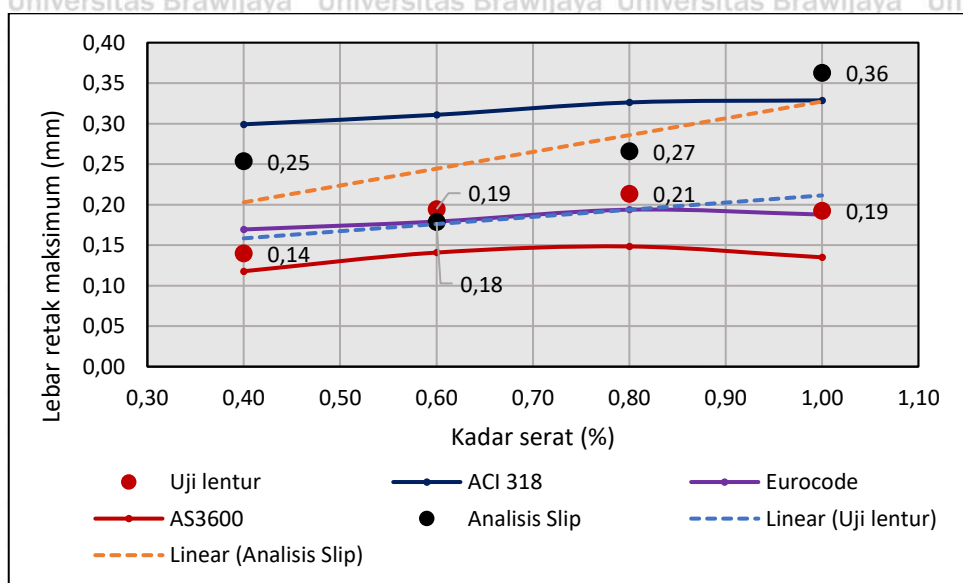
Tabel 5. 118 Prosentase Lebar Retak Maksimum Hasil Analisis Metode LEFM Terhadap Hasil Eksperimen

Pembanding	Prosentase lebar retak maksimum		
	PBE	TPB	F&M
Hasil uji lentur	116 %	117 %	152 %
Hasil analisis slip	86 %	87 %	111 %

Lebar retak maksimum pada saat terjadi keruntuhan pelat HPFRC yang dianalisis dengan metode LEFM sebagai konfigurasi PBE dan TPB berkisar 1,16 kali hasil uji lentur,

sedangkan dengan konfigurasi F&M mencapai nilai 1,52 kalinya. Namun jika dibandingkan dengan lebar retak maksimum yang diperoleh dari hasil analisis slip, maka lebar retak maksimum hasil analisis dengan konfigurasi PBE dan TPB berkisar pada 0,86 kali dan lebar retak maksimum dengan konfigurasi sebagai reaksi tulangan F dan momen M (F&M) bernilai sekitar 1,11 kali hasil analisis slip.

Diagram pada Gambar 5.105 memperlihatkan perbandingan lebar retak maksimum hasil eksperimen dibandingkan dengan hasil analisis berdasarkan ACI 318 atau ACI 224-2R, Eurocode 2-2014 maupun AS 3600-2000.



Gambar 5. 105 Perbandingan lebar retak maksimum hasil eksperimen terhadap hasil prediksi menurut ACI 318, Eurocode 2, dan AS 3600

Tabel 5. 119 Prosentase Lebar Retak Maksimum Hasil Eksperimen Terhadap Hasil Prediksi Menurut ACI 318 atau ACI 224-2R, Eurocode 2 dan AS-3600

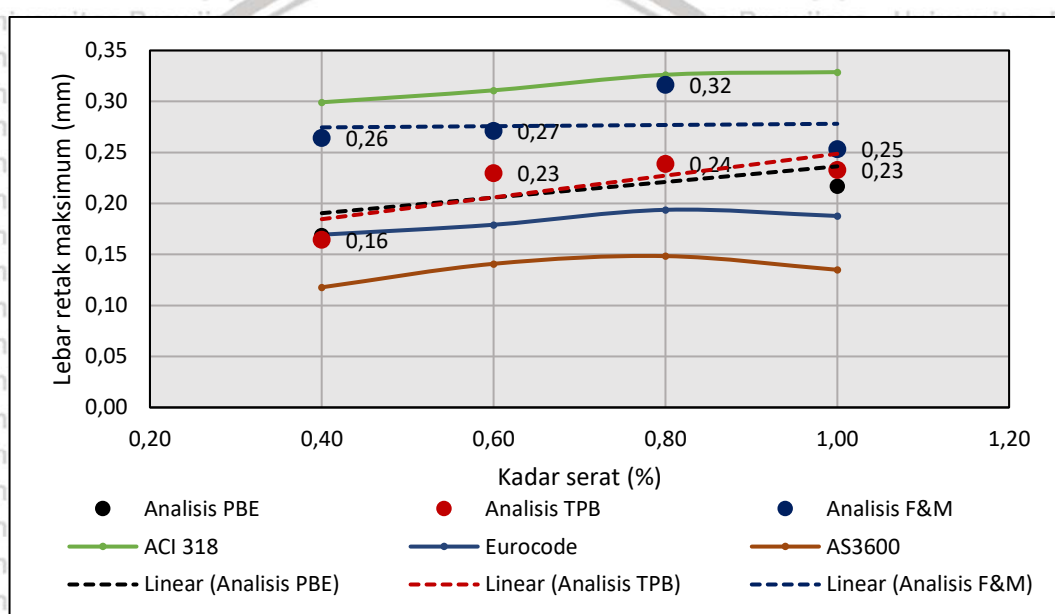
Metode pembanding menurut	Prosentase lebar retak maksimum	
	Uji lentur	Analisis slip
ACI 318 atau ACI 224.2R	58 %	83 %
Eurocode 2 - 2014	101 %	145 %
AS 3600-2000	136 %	197 %

Lebar retak maksimum hasil uji lentur berada dekat dengan hasil analisis berdasar peraturan Eurocode-2. Sementara hasil analisis slip lebih tinggi dan mendekati hasil analisis dengan peraturan ACI 318 dan ACI 224.2R. Apabila dihitung prosentase perbandingannya, hasilnya dapat dilihat pada Tabel 5.119. Lebar retak maksimum hasil uji lentur sekitar 0,58

kali lebih kecil dibanding lebar retak maksimum menurut ACI 318 atau ACI 224.2R.

Sedangkan lebar retak maksimum hasil analisis slip bernilai sekitar 0,83 kalinya. Sementara untuk analisis dengan Eurocode 2, maka hasil uji lentur bernilai 1,01 kalinya dan hasil analisis slip bernilai 1,45 kali. Jika dibandingkan dengan lebar retak maksimum yang dihitung dengan peraturan AS-3600, maka hasil uji lentur bernilai 1,36 kali dan hasil analisis slip bernilai 1,97 kali.

Pada Gambar 5.106 ditampilkan perbandingan antara hasil analisis lebar retak maksimum yang menggunakan metode LEFM dengan tiga konfigurasi PBE, TPB, dan F&M dibandingkan dengan hasil analisis menurut peraturan beton ACI 318 atau ACI 224-2R, Eurocode 2 dan AS-3600.



Gambar 5.106 Perbandingan lebar retak maksimum hasil analisis metode LEFM terhadap hasil prediksi menurut ACI 318 atau ACI 224-2R, Eurocode 2 dan AS-3600

Apabila rata-rata lebar retak maksimum yang dihitung dengan metode LEFM dibandingkan dengan hasil analisis menurut ketiga peraturan tersebut, maka hasilnya dapat dilihat pada Tabel 5.120. Terlihat bahwa lebar retak maksimum hasil analisis dengan konfigurasi PBE dan TPB hasilnya lebih mendekati pada lebar retak maksimum hasil analisis peraturan Eurocode 2. Sedangkan dengan konfigurasi F&M lebih mendekati peraturan ACI 318 atau ACI 224.2R. Sementara apabila dibandingkan dengan peraturan AS-3600, maka nilai yang didapat sekitar 1,57 hingga 2,04 kalinya.

Tabel 5. 120 Prosentasi Lebar Retak Maksimum Hasil Analisis Metode LEFM Terhadap Hasil Prediksi Menurut ACI 318 atau ACI 224-2R, Eurocode 2 dan AS-3600

Metode pembanding menurut	Perbandingan prediksi lebar retak maksimum metode LEFM dengan konfigurasi		
	PBE	TPB	F&M
ACI 318 atau ACI 224.2R	67 %	68 %	87 %
Eurocode 2 - 2014	117 %	118 %	151 %
AS-3600	157 %	159 %	204 %

Dari perbandingan yang telah dilakukan pada Tabel 5.118 hingga 5.120 memperlihatkan bahwa lebar retak maksimum pelat HPFRC pada saat terjadi keruntuhan hasil analisis dengan metode *Linear Elastic Fracture Mechanics* (LEFM) dengan konfigurasi sebagai elemen lentur murni PBE, elemen lentur tiga titik TPB dan konfigurasi sebagai reaksi tulangan F dan momen lentur M (F&M) berada diantara hasil analisis dengan metode ACI dan kedua peraturan beton yang lain. Demikian juga dengan hasil Eksperimen yang dilakukan, nilainya berdekatan dengan hasil analisis yang dilakukan.

5.10.5 Aplikasi persamaan lebar retak pada pelat HPFRC satu arah yang diuji

Untuk menentukan persamaan yang dapat dijadikan sebagai persamaan lebar retak maksimum akhir dengan metode *Linear Elastic Fracture Mechanics*, maka persamaan lebar retak masing-masing pelat yang dianalisis dengan konfigurasi sebagai elemen lentur murni (PBE) pada Tabel 5.118 diaplikasikan untuk menganalisis lebar retak keempat pelat HPFRC yang diuji, hasilnya dapat terlihat pada Tabel 5.121.

Tabel 5. 121 Persamaan Lebar Retak Maksimum Pelat HPFRC Dengan Konfigurasi Elemen Lentur Murni (PBE)

Pelat	Persamaan lebar retak maksimum
HPFRC-1	$w_{maks1} = \frac{M}{Ebh} (41,88 \xi - 78,20 \xi^2 + 14303,76 \xi^3 - 35803,20 \xi^4 + 22563,60 \xi^5)$
HPFRC-2	$w_{maks2} = \frac{M}{Ebh} (56,50 \xi - 58,35 \xi^2 + 12688,56 \xi^3 - 32114,40 \xi^4 + 20437,20 \xi^5)$
HPFRC-3	$w_{maks3} = \frac{M}{Ebh} (49,09 \xi + 295,03 \xi^2 - 9207,60 \xi^3 + 20112,48 \xi^4 - 11353,20 \xi^5)$
HPFRC-4	$w_{maks4} = \frac{M}{Ebh} (55,26 \xi + 465,10 \xi^2 - 16150,32 \xi^3 + 35515,20 \xi^4 - 20148,00 \xi^5)$

Tabel 5. 122 Hasil Prediksi Lebar Retak Maksimum Pelat HPFRC Menggunakan 4 Persamaan Hasil Analisis LEFM dengan Konfigurasi Elemen Lentur Murni

Pelat	a/h	Lebar Retak Maksimum Dengan Konfigurasi PBE				Hasil uji lentur
		$W_{maks 1}$	$W_{maks 2}$	$W_{maks 3}$	$W_{maks 4}$	
HPFRC-1	0.824	0.169	0.219	0.165	0.152	0.140
HPFRC-2	0.827	0.183	0.235	0.175	0.165	0.194
HPFRC-3	0.898	0.856	0.918	0.238	0.221	0.213
HPFRC-4	0.871	0.418	0.473	0.208	0.217	0.192

Demikian juga apabila persamaan lebar retak yang disusun menggunakan konfigurasi elemen lentur tiga titik (TPB) sebagaimana pada Tabel 5.123 digunakan untuk menghitung lebar retak pelat yang lain, maka didapat hasil seperti pada Tabel 5.124.

Tabel 5. 123 Persamaan Lebar Retak Maksimum Pelat HPFRC dengan Konfigurasi Elemen Lentur Tiga Titik (TPB)

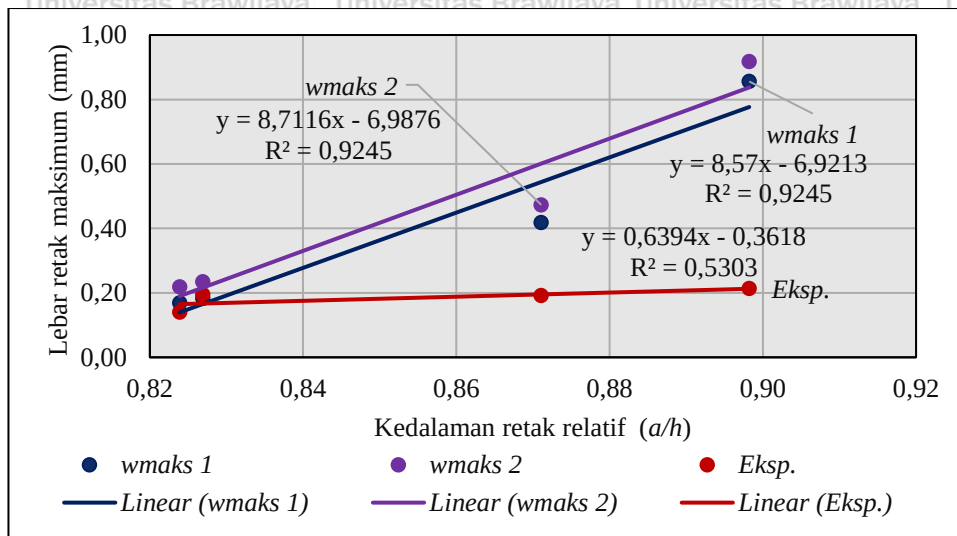
Pelat	Persamaan lebar retak
HPFRC-1	$W_{maks1} = \frac{PL}{Ebh} (10,47 \xi - 19,55 \xi^2 + 3575,94 \xi^3 - 8950,8 \xi^4 + 5640,84 \xi^5)$
HPFRC-2	$W_{maks2} = \frac{PL}{Ebh} (14,13 \xi - 14,58 \xi^2 + 3171,9 \xi^3 - 8028,0 \xi^4 + 5108,94 \xi^5)$
HPFRC-3	$W_{maks3} = \frac{PL}{Ebh} (12,27 \xi + 73,76 \xi^2 - 2302,08 \xi^3 + 5028,6 \xi^4 - 2838,54 \xi^5)$
HPFRC-4	$W_{maks4} = \frac{PL}{Ebh} (13,8 \xi + 121,36 \xi^2 - 4388,76 \xi^3 + 9672,0 \xi^4 - 5489,88 \xi^5)$

Tabel 5. 124 Hasil Prediksi Lebar Retak Maksimum Pelat HPFRC Menggunakan 4 Persamaan Hasil Analisis LEFM Sebagai Konfigurasi Elemen Lentur Tiga Titik

Pelat	a/h	Lebar Retak Maksimum Dengan Konfigurasi TPB				Hasil uji lentur
		$W_{maks 1}$	$W_{maks 2}$	$W_{maks 3}$	$W_{maks 4}$	
HPFRC-1	0.824	0.165	0.214	0.162	0.157	0.140
HPFRC-2	0.827	0.178	0.230	0.172	0.171	0.194
HPFRC-3	0.898	0.855	0.918	0.239	0.238	0.213
HPFRC-4	0.871	0.418	0.473	0.208	0.233	0.192

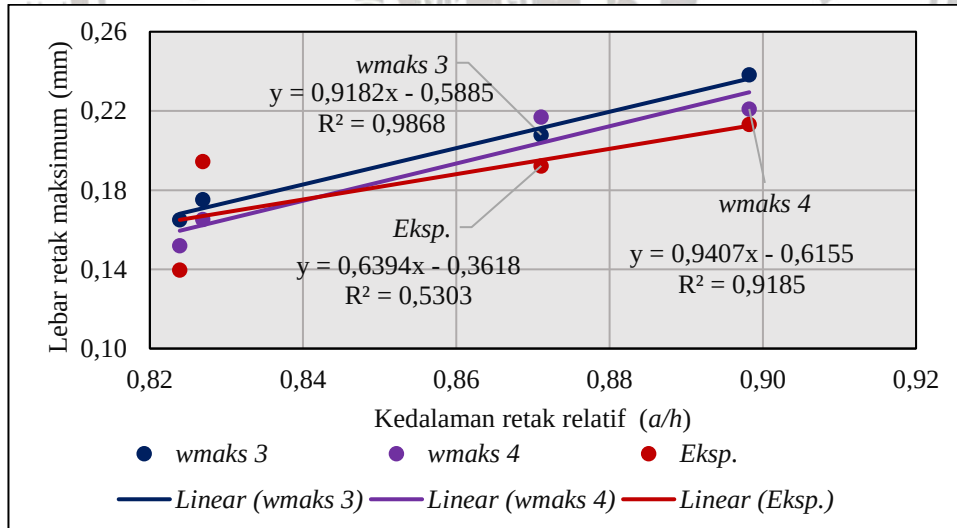
Jika dilihat dari nilai lebar retak maksimum yang tercantum pada Tabel 5.123 dan Tabel 5.124, terlihat bahwa lebar retak maksimum hasil perhitungan yang diperoleh dengan konfigurasi PBE maupun TPB relatif sama. Selanjutnya pada Gambar 5.107 dicoba untuk menggambarkan hubungan antara kedalaman retak relatif dengan lebar retak maksimum pada keempat pelat HPFRC yang dihitung menggunakan persamaan w_{maks1} (dari analisis pelat HPFRC-1) dan w_{maks2} (dari analisis pelat HPFRC-2). Hasilnya dibandingkan dengan hasil Eksperimen. Terlihat bahwa persamaan w_{maks1} dan w_{maks2} menimbulkan penyimpangan

hasil perhitungan yang sangat besar saat digunakan untuk menghitung pelat HFPFC-3 dan pelat HPFRC-4.



Gambar 5.107 Hubungan kedalaman retak relatif dan lebar retak yang dianalisis berdasar persamaan w_{maks1} dan w_{maks2} sebagai konfigurasi PBE dan TPB

Selanjutnya pada Gambar 5.108 dilakukan perbandingan antara kedalaman retak relatif dengan lebar retak maksimum keempat pelat HPFRC yang dianalisis dengan persamaan w_{maks3} (dari analisis pelat HPFRC-3) dan w_{maks4} (dari analisis pelat HPFRC-4).



Gambar 5.108 Hubungan kedalaman retak relatif dan lebar retak maksimum yang dianalisis berdasar persamaan w_{maks3} dan w_{maks4} sebagai konfigurasi PBE dan TPB

Dari Gambar 5.108 ini terlihat bahwa persamaan w_{maks3} dan w_{maks4} yang didapat dari hasil analisis pelat HPFRC-3 memberikan hasil prediksi lebar retak maksimum yang lebih mendekati hasil Eksperimen untuk keempat pelat HPFRC. Karena kedalaman retak relatif untuk w_{maks3} lebih besar dari w_{maks4} , dan berdasar pada data Tabel 5.124 maka selanjutnya dipergunakan persamaan w_{maks3} untuk menghitung lebar retak pelat HPFRC pada pengujian

ini. Adapun batasan kedalaman retak relatif yang sesuai dengan persamaan tersebut adalah sebesar $0,76 \leq a/h \leq 0,90$ dan mutu beton serat kinerja tinggi berada pada batasan antara 55 MPa hingga 70 MPa dengan menggunakan serat fiber baja berkait serta rasio bentang terhadap tebal $L/h = 20$ (elemen struktur berupa pelat atau balok lebar). Dengan demikian, persamaan yang dapat digunakan untuk menganalisis lebar retak maksimum adalah

$$w_{maks} = \frac{M}{Ebh} (49,09\xi + 295,03 \xi^2 - 9207,60 \xi^3 + 20112,48 \xi^4 - 11353,20 \xi^5) \quad (5-51)$$

untuk konfigurasi pelat sebagai elemen lentur murni (PBE) dan persamaan lebar retak maksimum

$$w_{maks} = \frac{PL}{Ebh} (12,27\xi + 73,76 \xi^2 - 2302,08 \xi^3 + 5028,6 \xi^4 - 2838,54 \xi^5) \quad (5-52)$$

untuk konfigurasi pelat sebagai elemen lentur tiga titik (TPB). Sedangkan untuk analisis lebar retak dengan konfigurasi akibat reaksi tulangan dan momen (F&M) sebagai konsekuensi persamaan di atas, maka digunakan persamaan yang dianalisis dari pelat HPFRC-3 dengan persamaan lebar retak maksimum

$$w_{maks} = -\delta_{FM} + \delta_{FF} \quad (5-53)$$

dengan nilai lebar retak akibat momen M^* adalah

$$\delta_{FM} = \frac{4\sigma}{E} \left[a + \frac{K_{IM}^2}{2\pi\sigma_{ys}^2} \right] \quad (5-54)$$

dan lebar retak akibat reaksi tulangan F^* adalah

$$\delta_{FF} = \frac{4\sigma}{E} \left[a + \frac{K_{IF}^2}{2\pi\sigma_{ys}^2} \right] \quad (5-55)$$

Sedangkan nilai K_{IM} dan K_{IF} adalah persamaan

$$K_{IM} = \frac{M^*}{bh^{3/2}} [6(-0,0124 \xi^{1/2} + 124,761 \xi^{3/2} - 692,04 \xi^{5/2} + 1107,429 \xi^{7/2} - 544,852 \xi^{9/2})] \quad (5-56)$$

dan persamaan

$$K_{IF} = \frac{F^*}{bh^{1/2}} [-0,0096 \xi^{1/2} + 8,21 \xi^{3/2} - 308,37 \xi^{5/2} + 689,56 \xi^{7/2} - 394,37 \xi^{9/2}] \quad (5-57)$$

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



BAB VI PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Dari eksperimen dan analisis yang telah dilaksanakan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. *Mix design* campuran beton mutu tinggi menggunakan metode volume absolut, dengan batasan berupa rasio air – bahan pengikat (*W/B ratio*) sebesar 0,23 dan diameter maksimal kerikil 19 mm serta variasi kadar silika fume antara 0% hingga 15% terhadap berat semen mampu menghasilkan kuat tekan beton antara 64,84 MPa hingga 70,10 MPa. Dengan perbandingan komposisi Semen PPC : Pasir: Kerikil: Silika Fume: Air: Superplastisizer sebesar 1: 1,328: 1,76: 0,08: 0,213: 0,022 yang diusulkan, kuat tekan rata-rata optimum yang dapat dicapai secara teoritis adalah sebesar 70,70 MPa.

Pada awal proses pengecoran, sebagian superplastisizer dicampur ke dalam air pencampur. Kerikil, pasir, dan silika fume diaduk dalam mixer beton berkapasitas 350 liter selama kurang lebih 4 menit. Selanjutnya semen ditambahkan dan diaduk selama 3 menit hingga campuran terlihat berwarna coklat semen. Berikutnya air bercampur superplastisizer dituangkan ke dalam mixer dan diaduk selama 3 menit. Sisa superplastisizer dimasukkan ke dalam mixer dan setelah total waktu pengadukan 12 menit, campuran siap dituangkan ke dalam cetakan beton

2. Perilaku lentur dan lebar retak yang terjadi pada pelat beton serat kinerja tinggi satu arah yang diberi perlakuan berupa penambahan kadar serat baja antara 0,4% hingga 1,0% dari berat volume benda uji dapat diuraikan sebagai berikut:

- a. Keruntuhan yang terjadi pada pelat HPFRC satu arah yang diuji menunjukkan terjadinya keruntuhan lentur, yaitu ditandai dengan pola retakan tegak lurus bidang datar di sisi bawah pelat yang dimulai dari tengah bentang. Dengan bertambahnya kadar serat baja, pelat HPFRC satu arah yang diuji mampu meningkatkan kinerjanya dalam bentuk menahan beban layan yang lebih besar pada saat runtuh. Peningkatan kinerja juga ditunjukkan oleh adanya kecenderungan peningkatan nilai kuat tekan

rata-rata, modulus elastisitas, kuat tarik belah, kuat tarik cabut, maupun hasil pengujian lentur spesimen balok dan spesimen pelat.

b. Pada saat beban layan yang terjadi semakin membesar, lendutan yang terjadi pada pelat justru mengalami penurunan. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya kuat lekat (*bond stress*) antara beton serat kinerja tinggi dan baja tulangan sebagai pengaruh penggunaan serat baja. Peningkatan kuat lekat ini juga ditunjukkan oleh bertambahnya tegangan tarik baja maupun *modulus of rupture* (tegangan tarik lentur) beton pada saat pelat mengalami kegagalan lentur.

c. Berdasarkan hasil pengujian lebar retak, idealisasi perilaku lebar retak pada pelat satu arah yang mengalami keruntuhan pelat sebelum terjadinya leleh baja tulangan menunjukkan pola linier. Sedangkan pada pelat yang baru mengalami keruntuhan setelah terjadinya leleh pada baja tulangan, perilaku lebar retaknya diidealisasikan dengan pola bilinier atau parabola.

d. Dengan dimensi pelat yang sama, akibat dari peningkatan beban layan, lebar retak yang terjadi pada saat pelat HPFRC runtuh meningkat secara proporsional. Hal ini sesuai dengan hasil pengujian yang memperlihatkan bahwa penambahan serat juga diikuti dengan peningkatan pada hasil pengujian tegangan tekan rata-rata, tegangan tarik belah, tegangan tarik cabut, tegangan tarik lentur (*modulus of rupture*), tegangan tarik baja, dan tegangan lekat. Dengan demikian peningkatan kinerja pelat HPFRC akibat penambahan kadar serat adalah berupa peningkatan kapasitas pelat untuk menahan beban layan, namun analisis lebar retak yang terjadi lebih dipengaruhi oleh sifat geometri atau dimensi dari elemen struktur yang diuji.

3. Persamaan lebar retak maksimum yang memperhitungkan parameter perilaku lekatan (*bond behavior parameter*) antara beton dan baja tulangan serta parameter perilaku lentur (*flexural behavior parameter*) beton serat kinerja tinggi secara implisit pada pelat satu arah dengan batasan berupa kedalaman retak relatif ($\xi = a/h$) antara $0,76 \leq \xi \leq 0,90$ dan mutu beton serat kinerja tinggi berada antara $55 \text{ MPa} \leq f'_c \leq 70 \text{ MPa}$ dengan menggunakan serat fiber baja berkait serta rasio bentang terhadap tebal $L/h = 20$ (elemen struktur berupa pelat atau balok lebar) yang dianalisis menggunakan pendekatan *linear elastic fracture mechanics* dapat dimodelkan dalam bentuk:

a. Persamaan lebar retak $w_{\max} = \frac{M}{E_{bh}} V(\xi)$ untuk konfigurasi pelat HPFRC sebagai elemen lentur murni (*the pure bending element*) dengan persamaan faktor geometri

$$V(\xi) = (49,09\xi + 295,03 \xi^2 - 9207,60 \xi^3 + 20112,48 \xi^4 - 11353,20 \xi^5).$$

- b. Persamaan lebar retak $w_{\max} = \frac{P_L}{E_{bh}} V(\xi)$ untuk konfigurasi pelat HPFRC sebagai elemen lentur tiga titik (*the three point bending element*) dengan persamaan faktor geometri adalah

$$V(\xi) = (12,27\xi + 73,76 \xi^2 - 2302,08 \xi^3 + 5028,6 \xi^4 - 2838,54 \xi^5)$$

- c. Persamaan faktor intensitas tegangan akibat momen $K_{IM} = \frac{M^*}{bh^{3/2}} Y_M(\xi)$, dengan

$$M^* = M - F \left(\frac{h}{2} - kd \right) \text{ dan reaksi hiperstatik tulangan } K_{IF} = \frac{F}{bh^{1/2}} Y_F(\xi), \text{ dengan}$$

$$Y_M(\xi) = [6(-0,0124 \xi^{1/2} + 124,761 \xi^{3/2} - 692,04 \xi^{5/2} + 1107,429 \xi^{7/2} - 544,852 \xi^{9/2})] \text{ dan } Y_F(\xi) [-0,0096 \xi^{1/2} + 8,21 \xi^{3/2} - 308,37 \xi^{5/2} + 689,56 \xi^{7/2} - 394,37 \xi^{9/2}] \text{ serta persamaan lebar retak maksimum:}$$

$$w_{\max} = -\delta_{FM} + \delta_{FF}, \text{ dengan } \delta_{FM} = \frac{4\sigma}{E} \left[a + \frac{K_{IM}^2}{2\pi\sigma_{ys}^2} \right] \text{ dan}$$

$$\delta_{FF} = \frac{4\sigma}{E} \left[a + \frac{K_{IF}^2}{2\pi\sigma_{ys}^2} \right]$$

Sebagai kesimpulan tambahan dapat disampaikan bahwa:

1. Pola tegangan regangan yang digunakan untuk menghitung modulus elastisitas pada hasil pengujian kuat tekan benda uji silinder beton serat kinerja tinggi menunjukkan perilaku yang cenderung linier, hal ini berbeda dengan hasil analisis tegangan-regangan menurut persamaan Hognestad yang cenderung berbentuk parabola.
2. Hasil analisis dengan metode *linear elastic fracture mechanics* (LEFM) yang menggunakan konfigurasi pelat HPFRC sebagai elemen lentur murni (PBE) dan konfigurasi pelat HPFRC sebagai elemen lentur tiga titik (TPB) menghasilkan prediksi lebar retak maksimum sekitar 67% apabila dibandingkan lebar retak maksimum menurut ACI 318 atau ACI 224.2R dan sekitar 117% apabila dibandingkan lebar retak maksimum menurut Eurocode 2, serta 157% apabila dibandingkan dengan lebar retak maksimum menurut AS 3600. Hasil ini bersesuaian dengan hasil uji lentur yang dilakukan.
3. Untuk hasil analisis yang menggunakan konfigurasi reaksi hiperstatik tulangan F dan momen lentur M (F&M) diperoleh perbandingan nilai lebar retak maksimum pelat HPFRC sebesar 87% terhadap lebar retak maksimum menurut ACI 318 atau ACI 224.2R dan 151% terhadap lebar retak maksimum menurut Eurocode dan 204% terhadap lebar retak maksimum menurut AS 360. Hasil ini mendekati lebar retak maksimum menurut hasil analisis slip yang memiliki perbandingan 83% terhadap lebar retak maksimum menurut ACI 318 atau ACI 224.2R, 145% terhadap lebar retak maksimum menurut Eurocode 2 dan 197% terhadap lebar retak maksimum menurut AS 3600.

6.2 Saran

1. Perlu dikembangkan panduan sosialisasi tentang metode pengecoran beton kinerja tinggi secara manual, agar hasil produksi beton di masyarakat dapat mencapai kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan yang telah dilaksanakan selama ini.
2. Dalam melaksanakan penelitian terkait masalah retak pada elemen struktur beton, akan sangat berguna apabila dilaksanakan pengamatan dan pendokumentasian terhadap tahapan perkembangan terbentuknya retakan sejak awal pembebanan hingga terjadinya keruntuhan elemen struktur.
3. Dengan banyaknya jenis superplastisizer yang tersedia, akan lebih baik apabila dilakukan pula pengujian-pengujian untuk mendapatkan kadar superplastisizer yang terbaik untuk meningkatkan workability beton serat kinerja tinggi, walaupun dalam setiap produk yang dipasarkan telah ditentukan dosis penggunaannya.
4. Pada pengujian kuat tekan beton serat kinerja tinggi selanjutnya perlu dilakukan pengamatan terhadap perilaku post peak curve terutama untuk elemen balok dan kolom, agar dapat disusun persamaan yang lebih sesuai untuk memprediksi perilaku tegangan regangan untuk jenis beton serat kinerja tinggi.
5. Dalam melakukan analisis *Fracture Toughness* maupun lebar retak dengan mekanika retakan elastik linier (*linear elastic fracture mechanics*), data utama yang harus diketahui dalam melakukan analisis adalah mengetahui besarnya momen atau tegangan yang terjadi pada saat elemen struktur mengalami keruntuhan. Selanjutnya perlu dipastikan model konfigurasi geometri dari elemen struktur yang akan digunakan untuk menganalisis semua parameter yang diperlukan.
6. Penerapan atau aplikasi persamaan-persamaan yang menggunakan perbandingan lebar retak relatif akan lebih akurat apabila pengujian pembebanannya dikembangkan dengan metode beban berulang (*repeated loading*) sehingga bisa diketahui nilai da/dN dengan N adalah siklus beban.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO T27/T11. (2014). *Sieve analysis of fine and coarse aggregates Field Operation Procedures for AASHTO T27*. Test Procedure AASHTO (Vol. 13). Oregon Department of Transportation.
- ACI 209R-92. (1997). *Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures*. ACI Committee Report (Reapproved, Vol. 209R). American Concrete Institute.
- ACI 211.1-91. (2009). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal Heavyweight, and Mass Concrete* (ACI 211.1-91) Reapproved 2009. ACI Committee Report. Washington, D.C.: American Concrete Institute.
- ACI 224.2R-92. (1997). *Cracking of concrete members in direct tension*. ACI Standard. Washington, D.C.: American Concrete Institute.
- ACI 224R-01. (2001). *Control of Cracking in Concrete Structures*. ACI Standard. Washington, D.C.: American Concrete Institute.
- ACI 234R-96. (2006). *Guide for the use of Silica Fume in Concrete*. ACI Committee Report. American Concrete Institute.
- ACI 318-02. (2002). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-02) and commentary (ACI 318R-02)*. ACI Committee Report. Washington, D.C.: American Concrete Institute.
- ACI 318-11. (2011). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary*. ACI Standard. Washington, D.C.: American Concrete Institute. [https://doi.org/10.1016/0262-5075\(85\)90032-6](https://doi.org/10.1016/0262-5075(85)90032-6)
- ACI 318-99. (1999). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-99) and commentary (ACI 318R-99)*. ACI Committee Report. Washington, D.C.: American Concrete Institute.
- ACI 318M-14. (2014). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318M-14) and commentary (ACI 318RM-14)*. ACI Standard. Washington, D.C.: American Concrete Institute.
- ACI 343R-95. (1995). *Analysis and Design of Reinforced Concrete Bridge Structures*. ACI Committee Report. Washington, D.C.: American Concrete Institute.
- ACI 363R-10. (2010). *Report on High-Strength Concrete*.
- ACI 363.2R-11. (2011). *Guide to Quality Control and Assurance of High-Strength Concrete*.
- ACI 363R-92. (1997). *State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete*. ACI Committee Report. Washington, D.C.: American Concrete Institute.
- ACI 363.2R-98. (1998). *Guide to Quality Control and Testing of High-Strength Concrete. Manual of Concrete Practice*. Washington, D.C.: American Concrete Institute.
- ACI 408.2R-12. (2012). *Report on bond of steel reinforcing bars under cyclic loads*. ACI-ASCE Committee Report. Washington, D.C.: American Concrete Institute.

ACI 408R-03. (2003). *Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension*. ACI Committee Report. Washington, D.C.: American Concrete Institute.

ACI 544.1R-96. (1997). *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete*. ACI Committee Report (Vol. 96). Washington, D.C.: American Concrete Institute.

Ahmad, M. S. (2016). Bond in Flexure: A Review of ACI CODE 408R. *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, 4(02), 79–84.

Aitcin, P. C. (2004). *High Performance Concrete*. Modern Concrete Technology 5. New York, NY 10001: The Taylor & Francis e-Library.

Alam, S. Y., Lenormand, T., Loukili, A., & Regoin, J. P. (2010). Measuring crack width and spacing in reinforced concrete members. In *Proceedings of FraMCoS-7* (pp. 377–382). Seoul: Korea Concrete Institute.

Allam, S. M., Shoukry, M. S., Rashad, G. E., & Hassan, A. S. (2012). Crack width evaluation for flexural RC members. *Alexandria Engineering Journal*, 51(3), 211–220. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2012.05.001>

Aulia, T. B., & Rinaldi. (2015). Bending capacity analysis of high-strength reinforced concrete beams using environmentally friendly synthetic fiber composites. *Procedia Engineering*, 125, 1121–1128. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.136>

ASTM C 117-03. (2012). *Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No . 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing*. ASTM Standard (Vol. 04). Washington, D.C.: American Society for Testing and Materials (ASTM).

ASTM C 131-03. (2003). *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine 1*. ASTM Standard (Vol. 04).

ASTM C 136-01. (2001). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. ASTM Standard. Washington, D.C.: American Society for Testing and Materials (ASTM).

ASTM C 1609/C1609M-12. (2012). *Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)*. ASTM Standard. Washington, D.C.: American Society for Testing and Materials (ASTM).

ASTM C 192/C 192M-02. (2002). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. ASTM Standard. Washington, D.C.: American Society for Testing and Materials (ASTM).

ASTM C 293-02. (2002). *Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with center-point loading)*. ASTM Standard. Washington, D.C.: American Society for Testing and Materials (ASTM).

ASTM C 31/C 31M-03a. (2003). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field*. ASTM Standard. Washington, D.C.: American Society for Testing and Materials (ASTM).

ASTM C 33-03. (2003). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM Standard. Washington, D.C.: American Society for Testing and Materials (ASTM).

ASTM C 39/C39M-03. (2003). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM Standard. Washington, D.C.: American Society for Testing and Materials (ASTM).

- ASTM C 469-02. (2002). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. ASTM Standard. Washington, D.C.: American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM C 496/C496M-04. (2004). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM Standard. Washington, D.C.: American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM C 78-02. (2002). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*. ASTM Standard. Washington, D.C.: American Society for Testing and Materials (ASTM).
https://doi.org/10.1520/C0078_C0078M-16
- ASTM C 900-01. (2001). *Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete*. ASTM Standard. Washington, D.C.: American Society for Testing and Materials (ASTM). <https://doi.org/10.1520/C0900-15>
- Avram, C., Facaoru, I., Filimon, I., Mirsu, O., & Terteu, I. (1981). *Concrete Strength and Strains*. Developments in Civil Engineering 3.
- Ayub, T., Shafiq, N., & Nuruddin, M. F. (2014). Mechanical properties of high-performance concrete reinforced with basalt fibers. *Procedia Engineering*, 77, 131–139.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.07.029>
- Bae, B.-I., Choi, H.-K., & Choi, C.-S. (2016). Bond stress between conventional reinforcement and steel fibre reinforced reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*, 112, 825–835. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.118>
- Beeby, A. W. (1979). Prediction of crack widths in hardened concrete. *Structural Engineer*, 57 A(1), 9–17.
- Bekaert. (2012a). *Dramix@ 3D 80/60 BG Data Sheet*. Dramix Data Sheet.
- Bekaert. (2012b). *Dramix Reinforcing the future*. Bekaert Building Products. NV Bekaert SA.
- BMS. (1992). *Peraturan perencanaan teknik jembatan*. Bridge Design Code.
- Borosnyói, A., & Snóbli, I. (2010). Crack width variation within the concrete cover of reinforced concrete members. *Építőanyag, Journal of the SZTE*, Hungarian Scientific Society of the Silicate Industry, 62(3), 70–74.
- Broek, D. (1982). *Elementary engineering fracture mechanics*. Dordrecht: Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-4333-9>
- Broek, D. (1989). *The practical use of fracture mechanics*. Fracture mechanics. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/10.1007/978-94-009-2558-8_11
- Broms, B. B. (1965). Crack Width and Crack Spacing In Reinforced Concrete Members. *ACI Journal Proceedings*, 62(10), 1237–1256.
- Broms, B. B., & Lutz, L. A. (1965). Effects of Arrangement of Reinforcement on Crack Width and Spacing of Reinforced Concrete. *ACI Journal Proceedings*, 62(11), 1395–1410. <https://doi.org/10.14359/11681>
- BS 8110-1:1997. (1999). *Structural use of concrete-Part 1*. Code of practice for design and construction. British Standards.

Carino, N. J., & Clifton, J. R. (1995). *Prediction of Cracking in Reinforced Concrete Structures*. National Institute of Standards and Technology, 49.

Carpinteri, A. (1981). *A fracture mechanics model for reinforced concrete collapse*.

Carpinteri, A. (1986). Mechanical damage and crack growth in concrete: plastic collapse to brittle fracture. *EAFM Series*. The Netherlands: Martinus Nijhoff Publishers.

Carpinteri, A. (1992). *Applications of fracture mechanics to reinforced concrete*. Elsevier Applied Science. London: Elsevier Science Publishers, LTD.

Carpinteri, A., Ferro, G., & Ventura, G. (2003). Size effects on flexural response of reinforced concrete elements with a nonlinear matrix. *Engineering Fracture Mechanics*, 70, 995–1013.

Carrasquillo, R. L., Nilson, A. H., & Slate, F. O. (1981). Properties of High Strength Concrete Subject to Short-Term Loads. *ACI Journal*, 78(3), 171–177. <https://doi.org/10.14359/11681>

CEB-FIP. (1993). *The CEB-FIP model code 1990*. Design Code. London: Thomas Telford Services Ltd. Thomas Telford House, 1 Heron Quay. <https://doi.org/10.1680/ceb-fipmc1990.35430>

Chi, M., & Kirstein, A. F. (1958). Flexural Cracks in Reinforced Concrete Beams. *ACI Journal Proceedings*, 54(4), 856–878.

Chowdhury, S. H., & Loo, Y. C. (2001). A New Formula for Prediction of Crack Widths in Reinforced and Partially Prestressed Concrete Beams. *Advances in Structural Engineering*, 4(2), 101–110.

Cohen, M. D., Olek, J., & Dolch, W. L. (1990). Mechanism of plastic shrinkage cracking in portland cement and portland cement-silica fume paste and mortar. *Cement and Concrete Research*, 20(1), 103–119. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(90\)90121-D](https://doi.org/10.1016/0008-8846(90)90121-D)

Ciavarella, M., Paggi, M., & Carpinteri, A. (2008). One, no one, and one hundred thousand crack propagation laws: A generalized Barenblatt and Botvina dimensional analysis approach to fatigue crack growth. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 56(12), 3416–3432. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2008.09.002>

Darwin, D., Zuo, J., Tholen, M. L., & Idun, E. K. (1996). Development length criteria for conventional and high relative rib area reinforcing bars. *ACI Structural Journal*, 93(3), 347–359.

Denneman, E., Wu, R., Kearsley, E. P., & Visser, A. T. (2011). Discrete fracture in high performance fibre reinforced concrete materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 78(10), 2235–2245. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2011.04.008>

Dotreppe, J.-C., Schnobrich, W. C., & Pecknold, D. A. (1973). Layered finite element procedure for inelastic analysis of reinforced concrete slabs. *IABSE Publications*, 33, 52–68. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5169/seals-25631>

Ductal. (2002). *Shepherds Creek Bridge*, Sydney, Australia - Joint Fill. Visit Ductal® Architecture Solutions, 2016.

Ductal. (2006). Mars Hill Bridge, Iowa, USA - *Precast elements*.

ECP 203-2007. (2007). *Egyptian code for design and construction of concrete structures*. Egyptian Code. Kairo, Arab Republic of Egypt: Ministry Of Housing, Utilities And Urban Communities, Housing And Building National Research Center.

- Esfahani, M. R., & Rangan, B. V. (2000). Influence of transverse reinforcement on bond strength of tensile splices. *Cement and Concrete Composites*, 22(3), 159–163. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00005-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00005-6)
- Eurocode 2. (2014). *Background & applications design of concrete buildings*. JRC Scientific and policy reports. Italy: European Commission Joint Research Centre Institute for the Protection and Security of the Citizen. <https://doi.org/10.2788/35386>
- Ferro, G., Tulliani, J. M., Jagdale, P., & Restuccia, L. (2014). New Concepts for Next Generation of High Performance Concretes. *Procedia Materials Science*, 3, 1760–1766. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.06.284>
- Ferro, G. (2002). Multilevel bridged crack model for high-performance concretes. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 38(2), 177–190. [https://doi.org/10.1016/S0167-8442\(02\)00086-1](https://doi.org/10.1016/S0167-8442(02)00086-1)
- Ferro, Giuseppe, Carpinteri, A., & Ventura, G. (2007). Minimum reinforcement in concrete structures and material / structural instability. *Int. J. Fract*, 146, 213–231. <https://doi.org/10.1007/s10704-007-9162-6>
- Frosch, R. J. (1999). Another Look at Cracking and Crack Control in Reinforced Concrete. *ACI Structural Journal*, 96(3), 437–442. <https://doi.org/10.14359/11681>
- Gali, S., & Subramaniam, K. V. L. (2017). Evaluation of crack propagation and post-cracking hinge-type behavior in the flexural response of steel fiber reinforced concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11(2), 365–375. <https://doi.org/10.1007/s40069-017-0197-4>
- Gergely, P., & Lutz, L. A. (1968). Maximum Crack Width in Reinforced Concrete Flexural Members. *ACI Special Publication*, 20, 87–117.
- Gilbert, R. (2009). Flexural crack control in reinforced concrete. *Australian Journal of Structural Engineering*, 9(2), 119–128. <https://doi.org/10.1080/13287982.2009.11465015>
- Graybeal, B. A. (2007). Compressive Behavior of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal*, 104(M17), 146–152.
- Graybeal, B., & Davis, M. (2008). Cylinder or Cube Strength Testing of 80 to 200 MPa Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced-Concrete. *ACI Materials Journal*, 105(November/December), 603–609. <https://doi.org/10.14359/20202>
- Habel, K., & Gauvreau, P. (2008). Response of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) to impact and static loading. *Cement and Concrete Composites*, 30(10), 938–946. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.09.001>
- Habel, K., Viviani, M., Denarié, E., & Brühwiler, E. (2006). Development of the mechanical properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC). *Cement and Concrete Research*, 36(7), 1362–1370. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.009>
- Hognestad, E. (1951). A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members. *Bulletin Series No. 399*, 128. <https://doi.org/10.14359/7785>
- Holland, T. C. (2005). *Silica Fume User's Manual*.
- Irwin, G. R. (1958). *Fracture. Handbuch Del' Physik*, VI(1958), 551–590. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-642-45887-3_5

Isida, M. (1955). On the Tension of a Strip with a Central Elliptic Hole (Part I). *Trans, Jap, Soc, Mech, Eng*, 21, 507–513.

IS 456:2000. (2000). *Plain and Reinforced Concrete Code of Practice*. Indian Standard (Fourth Rev). New Delhi 110002: Bureau of Indian Standards.

Jalal, M., Mansouri, E., Sharifipour, M., & Pouladkhan, A. R. (2012). Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO₂ micro and nanoparticles. *Materials and Design*, 34, 389–400. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.037>

Kaar, B. P. H., & Mattock, A. H. (1963). High strength bars as concrete reinforcement part 4. *Control of cracking*, 1–2.

Kaïkea, A., Achoura, D., Duplan, F., & Rizzuti, L. (2014). Effect of mineral admixtures and steel fiber volume contents on the behavior of high performance fiber reinforced concrete. *Materials & Design*. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.066>

Kelly, P. (2013). *Solid Mechanics Part II: Engineering Solid Mechanics* – small strain. Solid Mechanics.

King, D. (2012). The effect of silica fume on the properties of concrete as defined in concrete society report 74, cementitious materials. *Our World in Concrete & Structures*, 1–23.

Kmiecik, P., & Kaminski, M. (2011). Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, XI(3), 623–636.

Koiter, W. T. (1959). An infinite row of collinear cracks in an infinite elastic sheet. *Ingenieur-Archiv*, 28(1), 168–172. <https://doi.org/10.1007/BF00536108>

Kovler, K., & Roussel, N. (2011). Properties of fresh and hardened concrete. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 775–792. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.009>

Krisnamurti, Aswatama, W. K., & Widiarti, W. Y. (2014). Pengaruh Komposisi Material UHPC Terhadap Perilaku Kuat Tekan Mortar Beton. *Seminar Nasional X-2014 Teknik Sipil ITS Surabaya*, 99327.

Kwak, H.-G., & Filippou, F. C. (1990). Finite element analysis of reinforced concrete structures under monotonic loads. *Structural Engineering Mechanics and Materials*. Berkeley.

Lappa, E., Veen, C. van der, & Walraven, J. (2006). Fatigue Failure Properties of High and Ultra High Strength Fibre Reinforced Concrete. In *6th International PhD Symposium in Civil Engineering* (pp. 86–87).

Lee, S. C., Oh, J. H., & Cho, J. Y. (2015). Fiber orientation factor on rectangular cross-section in concrete members. *International Journal of Engineering and Technology*, 7(6), 470–473. <https://doi.org/10.7763/IJET.2015.V7.839>

Lim, E. (2004). *Seonyu-kyo pedestrian bridge Item No 38198*. Knowlton School Digital Library. Seonyudo Park, Seoul, South Korea: Austin E. Knowlton School Of Architecture, The Ohio State University.

Lin, C.-S., & Scordelis, A. C. (1975). Nonlinear Analysis of RC Shells of General Form. *ASCE, Journal of the Structural Division*, 5844.

Logan, D. L. (2007). *A First Course in the Finite Element Method* (4th ed., Vol. 147). Toronto, Ontario Canada: Nelson, a division of Thomson Canada Limited.

- Mobasher, B., Bakhshi, M., & Barsby, C. (2014). Backcalculation of residual tensile strength of regular and high performance fiber reinforced concrete from flexural tests. *Construction and Building Materials*, 70, 243–253. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.037>
- Nawy, E. G. (1990). *Beton bertulang (suatu pendekatan dasar)*. PT Eresco.
- Noguchi, T., Tomosawa, F., Nemati, K. M., Chiaia, B. M., & Fantilli, A. R. (2009). A practical equation for elastic modulus of concrete. *ACI Structural Journal*, 106(5), 690–696. <https://doi.org/10.14359/51663109>
- Newman, J., & Choo, B. S. (2003). *Advanced Concrete Technology Testing and Quality*. Elsevier. Burlington MA 01803: Butterworth-Heinemann An imprint of Elsevier.
- NCHRP Synthesis 441. (2013). *High Performance Concrete Specifications and Practices for Bridges, A Synthesis of Highway Practice*.
- NZS 3101. (2006). *Concrete Structures Standard, Part 1: The Design of Concrete Structures*. Standards Association of New Zealand (Vol. 1). <https://doi.org/ISBN 1-86975-043-8>
- Oertel, T., Hutter, F., Tänzer, R., Helbig, U., & Sextl, G. (2013). Primary particle size and agglomerate size effects of amorphous silica in ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 37(1), 61–67. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.12.005>
- Oh, B. H., & Kang, Y. J. (1987). New Formulas for Maximum Crack Width and Crack Spacing in Reinforced Concrete Flexural. *ACI Structural Journal*, 84(2), 103–112. <https://doi.org/10.14359/11681>
- Orangun, C. O., Jirsa, J. O., & Breen, J. E. (1977). A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices. *ACI Journal*, 74(11), 114–122.
- Ouchi, M., Hibino, M., & Okamura, H. (1996). Effect of superplasticizer on self-compactability of fresh concrete. *Transportation Research Record*, 1574(970284), 37–40.
- Ozbakkaloglu, T., & Saatcioglu, M. (2004). Rectangular stress block for high-strength concrete. *ACI Structural Journal*, 101(4), 475–483.
- Park, R., & Paulay, T. (1975). *Reinforced concrete structures*. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Patrick, M., & Wheeler, A. (2000). *Crack Control of Slabs Part 1: AS 3600 Design* (Vol. 1). OneSteel Reinforcing OneSteel Reinforcing Pty Ltd ACN 004 148 289 Produced.
- Penta-Ocean Construction Co., L. (2010). *Tokyo International Airport (Haneda Airport) Runway D*.
- Piyasena, R. (2002). Crack spacing, crack width, and tension stiffening effect in reinforced concrete beams and one-way slabs. *Ph.D. Thesis*.
- Rao, G. A., Pandurangan, K., Sultana, F., & Eligehausen, R. (2007). Studies on the pull-out strength of ribbed bars in high-strength concrete. *FraMCoS-6* (Italy), 05–17.
- Rigaud, S., Chanvillard, G., & Chen, J. (2012). Characterization of Bending and Tensile Behavior of Ultra-High Performance Concrete Containing Glass Fibers. *HPFRCC 6*.
- Rouelle. (1999). the French Nuclear Power Plant Reactor Building Containment Improving Confinement Performance With the Latest Civil Works Technics for Structure Integrity,

- Dynamic Behaviour and Seismic Design. *7th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-7151)*, 1–10.
- Structurae. (1997). *Sherbrooke Footbridge*.
- Scanlon, A., & Murray, D. W. (1971). Time Dependent Deflections of Reinforced Concrete Slabs.pdf. *Structural Engineering Report No. 38*. Edmonton, Canada.
- Schlumpf, J., Bicher, B., & Schwoon, O. (2013). *Sika Concrete Handbook*. (Sika Services AG, Ed.), New Concrete Handbook. Zurich: Sika AG.
- Shanghai Topken Silica Fume Co. Ltd. (2011). *Technical data of Silica Fume by several countries*. Standards & TDS.
- Shannag, M. J., Abu-Dyya, N., & Abu-Farsakh, G. (2005). Lateral load response of high performance fiber reinforced concrete beam-column joints. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.007>
- Shionaga, R., Walraven, J. C., Uijl, J. A. den, & Sato, Y. (2006). Structural Behavior of High Performance Fiber Reinforced Concrete in Tension and Bending. *6th International PhD Symposium in Civil Engineering*.
- Sika. (2016). *Sika® ViscoCrete® -3115 N*, Concrete admixture for high flow / self-compacting concrete. *Product Data Sheet*. Bogor, Indonesia: PT Sika Indonesia.
- Sika. (2017). Concrete Additive based on Silica Fume Technology. *Product Data Sheet SikaFume*. Bogor, Indonesia: PT. Sika Indonesia.
- Sika Building Trust. (2016). *SikaFume® Densified Silica Fume*. *Product Data Sheet*.
- SNI 03-1968-1990. (1990). *Metode pengujian analisis saringan Agregat halus dan kasar*. Standar Nasional Indonesia. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional - BSN.
- SNI 03-1971-1990. (1990). *Metode pengujian kadar air agregat*. Bandung: Badan Standardisasi Indonesia. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional - BSN.
- SNI 03-1974-1990. (1990). *Metode pengujian kuat tekan beton*. Standar Nasional Indonesia. Badan Standardisasi Nasional - BSN.
- SNI 03-2491-2002. (2002). *Metode pengujian kuat tarik belah beton*. Badan Standar Nasional Indonesia. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional - BSN.
- SNI 03-2834-2000. (2000). *Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal*. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional - BSN.
- SNI 03-4154-1996. (1996). *Metode pengujian kuat lentur beton dengan balok uji sederhana yang dibebani terpusat langsung*. Standar Nasional Indonesia. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional - BSN.
- SNI 03-4804-1998. (1998). *Metode pengujian bobot isi dan rongga udara dalam agregat*. Standar Nasional Indonesia. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional - BSN.
- SNI 03-6468-2000. (2000). *Tata cara perencanaan campuran tinggi dengan semen portland dengan abu terbang*. Standar Nasional Indonesia. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional - BSN.
- SNI 03-6815-2002. (2002). *Tata cara mengevaluasi hasil uji kekuatan beton*. Standar Nasional Indonesia. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional - BSN.
- SNI 15-0302-2004. (2004). *Semen portland pozolan*. Standar Nasional Indonesia. Jakarta, Indonesia: Badan Standardisasi Nasional - BSN.

- SNI 15-2049-2004. (2004). *Semen portland*. Standar Nasional Indonesia. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional - BSN.
- SNI 1969:2008. (2008). *Cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat kasar*. Standar Nasional Indonesia. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional - BSN.
- SNI 1970:2008. (2008). *Cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat halus*. Standar Nasional Indonesia. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional - BSN.
- SNI 2417:2008. (2008). *Cara uji keausan agregat dengan mesin abrasi Los Angeles*. Standar Nasional Indonesia. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional - BSN.
- SNI 2847:2013. (2013). *Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung*. Standar Nasional Indonesia. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional - BSN.
- SNI 4431:2011. (2011). *Cara uji kuat lentur beton normal dengan dua titik pembebanan*. Standar Nasional Indonesia. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional - BSN.
- SNI 7656:2012. (2012). *Tata cara pemilihan campuran untuk beton normal, beton berat dan beton massa*. Standar Nasional Indonesia. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional - BSN.
- Soehardjono, A., Raka, I., & Suprobo, P. (2006). Crack width prediction for precast reinforced concrete (PRC) slabs under repeated loadings. In *The Tenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-10)* (pp. 33–38). Bangkok, Thailand: Asian Institute of Technology, Thailand.
- Soehardjono, A. (2004). *Pengaruh Angka Tulangan dan Beban Berulang Terhadap Lebar Retak (w) Pelat Beton Satu Arah*.
- Soltanzadeh, F., Barros, J. A. O., & Santos, R. F. C. (2015). High performance fiber reinforced concrete for the shear reinforcement: Experimental and numerical research. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.003>
- Stang, H., & Aarre, T. (1992). Evaluation of crack width in FRC with conventional reinforcement. *Cement and Concrete Composites*, 14(2), 143–154. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(92\)90007-I](https://doi.org/10.1016/0958-9465(92)90007-I)
- Suseno, H. (2018). Perilaku retak dan prediksi lebar retak pelat satu arah dari beton ringan batu apung dan skoria bertulang. *Ringkasan Disertasi*. Universitas Brawijaya.
- Suseno, H., Soehardjono, A., Wardana, I. N. G., & Rachmansyah, A. (2018). Performance of lightweight concrete one-way slabs using medium-K basaltic andesite pumice and scoria. *Asian Journal of Civil Engineering*, 19(4), 473–485. <https://doi.org/10.1007/s42107-018-0047-y>
- Tada, H., Paris, P. C., & Irwin, G. R. (2000). *The stress analysis of cracks handbook*, third edition. The American Society of Mechanical Engineers. New York, NY 10016: ASME Press.
- Tailhan, J. L., Rossi, P., & Boulay, C. (2012). Tensile and bending behaviour of a strain hardening cement-based composite: Experimental and numerical analysis. *Cement and Concrete Composites*, 34(2), 166–171. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.10.005>
- The Building Departement (BD). (2013). *Code of practice for structural use of concrete (TC). The Codes of Practice and Design Manuals*. Hong Kong: The Government of the Hong Kong Special Administrative Region.

Toutlemonde, F., Roenelle, P., Hajar, Z., Simon, A., Lapeyrère, R., Martin, R.-P., ... Baron, L. (2013). Long-term material performance checked on world's oldest UHPFRC road bridges at Bourg-Lès-Valence. In *RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*, UHPFRC 2013 (pp. 265–274). Marseille, France LONG-TERM.

Tudjono, S., Pamungkas, A. S., & Lie, H. A. (2014). Modelling the Relationship of the Flexural Rigidity Factor and Reinforcement Ratio by Numerical Simulation. *Procedia Engineering*, 95(Scescm), 241–251. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.184>

TRB. (2006). *Control of Cracking in Concrete*, State of the Art. Circular, Transportation Research. Transportation Research Board, Basic Research and Emerging Technologies Related to Concrete Committee.

Venkateswarlu, B., & Gesund, H. (1972). *Cracking and Bond Slip in Concrete Beams*. American Society of Civil Engineers, (12), 2663–2685.

Voo, Y. L., Nematollahi, B., Said, A. B. B. M., Gopal, B. A., & Yee, T. S. (2012). Application of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete–The Malaysia Perspective. *International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology*, 3(1), 26–44.

VSL. (2012). *Sakata Mirai Bridge*. Sakata, Japan. VSL Group Brochure. VSL Infrastructure Protection Ltd.

Wang, S., Zhang, M. H., & Quek, S. T. (2012). Mechanical behavior of fiber-reinforced high-strength concrete subjected to high strain-rate compressive loading. *Construction and Building Materials*, 31, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.083>

Watstein, D., & Parsons, D. E. (1943). Width and spacing of tensile cracks in axially reinforced concrete cylinders. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 31(1), 1. <https://doi.org/10.6028/jres.031.001>

Wikipedia. (2016). *Civaux Nuclear Power Plant*. Nuclear Power Stations in France.

Xu, T., Zhu, L., Castel, A., & Gilbert, R. I. (2018). Assessing immediate and time-dependent instantaneous stiffness of cracked reinforced concrete beams using residual cracks. *Journal of Structural Engineering*, 144(4), 04018022. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002009](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002009)

Zuo, J., & Darwin, D. (2000). Splice strength of conventional and high relative rib area bars in normal and high-strength concrete. *ACI Structural Journal*, 97(4), 630–641. <https://doi.org/10.14359/7428>

DAFTAR PUBLIKASI DAN KEGIATAN ILMIAH PENULIS

IDENTITAS

1. Nama lengkap : Krisnamurti, Ir., MT.
2. NIM : 147060100111007
3. Program Studi : S3-Teknik Sipil
4. Minat : Rekayasa Struktur
5. Alamat email : murti_krisna.teknik@unej.ac.id
6. Nomor Telp./HP : 0341-489240/0811355128
7. Instansi Asal : Jurusan Teknik Sipil, Fak. Teknik Univ. Jember
8. Pangkat dan golongan : Pembina Tingkat I / IVb
9. Alamat Instansi : Jl. Kalimantan 37 Jember / 0331- 484977

RIWAYAT PENDIDIKAN

1. Program Doktor Teknik Sipil (Rekayasa Struktur) Jurusan Teknik Sipil, FT-UB 2014-2019.
2. Magister Teknik Sipil (Rekayasa Struktur) Program Pasca Sarjana Universitas Brawijaya 2004-2006
3. Sarjana Teknik Sipil Jurusan Teknik Sipil, FT-UB Tahun 1986-1990

KEGIATAN SELAMA STUDI LANJUT S3

1. Penelitian:
 - a. *Uji Efektifitas Serat Dan Butiran Mikro Sebagai Perubah Sifat Mikrostruktur Beton Terhadap Kinerja Lentur Pelat High Performance Fiber Reinforce Concrete*. DIPA DRPM Kemenristekdikti. Ketua Peneliti. Penelitian Disertasi Doktor. 2017.
2. Publikasi Seminar:
 - a. Krisnamurti, Agoes Soehardjono, Achfas Zacoeb, Ari Wibowo. 2018. *Flexural performance of HPFRC plates using PPC and variation of steel fiber composition*. 4th International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering (ICRMCE-04). Best Western Premier Hotel, Solo Baru, July,11-12. MATEC Web of Conferences 195, 02003. DOI: 10.1051/mateconf/201819502003.
 - b. Krisnamurti, Agoes Soehardjono, Achfas Zacoeb, Ari Wibowo. 2017. *Finite Element Modeling of Bending Failure at HPFRC Plates using 2-Dimensional*

Isoparametric Element. Engineering International Conference (EIC) 2016. Proceedings of the 5th International Conference on Education, Concept, and Application of Green Technology. Semarang: FT-Unnes, October 5th. AIP Conference Proceedings 1818, 020025. DOI: 10.1063/1.4976889.

c. Krisnamurti. 2017. *Perencanaan Beton Kinerja Tinggi dengan Semen Portland Pozzolan (PPC) menggunakan Metode Volume Absolut*. Konferensi Nasional Teknik Sipil dan Infrastruktur (KONTSI) ke-1 2017. Tantangan Teknik Sipil Dalam Mendukung Percepatan Pembangunan Infrastruktur di Indonesia. Jurusan Teknik Sipil, FT-Universitas Jember. ISBN 978-602-61803-8-4.

d. Krisnamurti, Agoes Soehardjono, Achfas Zacoeb, Ari Wibowo. 2016. *Flexural Analysis of HPFRC Plates Subjected by Monotonic Loading using 2-D Isoparametric Element and Mindlin Plate Element*. The 2nd International Multidisciplinary Conference 2016. Universitas Muhammadiyah Jakarta (The 2nd IMC-UMJ). Jakarta: November 15th.

3. Publikasi Jurnal:

a. Krisnamurti, Agoes Soehardjono, Achfas Zacoeb, Ari Wibowo. 2018. *Development of Mix Design Method in Efforts to Increase Concrete Performance Using Portland Pozzolana Cement (PPC)*, Journal of Physics: Conf. Series 953: 012016. DOI:10.1088/1742-6596/953/1/012016

b. Krisnamurti, Agoes Soehardjono, Achfas Zacoeb, Ari Wibowo. 2017. *Bending Failure Analysis at HPFRC Plates with Various Depth and Loading Program*. International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology, Vol. 7 (2017) No. 6, pages: 2004-2011, DOI:10.18517/ijaseit.7.6.2557.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Evolusi Perkembangan Teknologi Beton Kinerja Tinggi

Tahun	Perkembangan Beton Kinerja Tinggi	Keterangan
1980	Konsep HPC diperkenalkan dan dikaitkan dengan beton kekuatan tinggi untuk kolom <i>high-rise building</i> (NCHRP Synthesis 441, 2013).	Diaplikasikan pada <i>The East Huntington Bridge</i> (Sungai Ohio) dan <i>Tower Road Bridge</i> (Washington)
1987	<i>Strategic Highway Research Program</i> (SHRP) dimulai untuk mengembangkan dan mengevaluasi teknik dan teknologi untuk melawan penurunan kondisi jalan raya nasional. Salah satunya dikenal dengan nama proyek C-205 berjudul “ <i>Mechanical Behavior of High Performance Concrete</i> ”, dengan kegiatan proyek berupa pencarian literatur dan review antara tahun 1974-1989 sebanyak 830 referensi, untuk mendefinisikan pengetahuan tentang sifat mekanik HPC (NCHRP Synthesis 441, 2013).	SHRP menerbitkan 6 laporan tentang <i>Summary Report, High Performance Concrete, Very Early Strength (VES) Concrete, High Early Strength (HES) Concrete, Very High Strength (VHS), dan High Early Strength Fiber-Reinforced Concrete (HESFRC)</i> .
1990	<i>The engineering and construction division of electricite de france</i> (EDF) memilih <i>High Strength/High Performance Concrete</i> untuk tumpungan internal Pembangkit listrik tenaga nuklir CIVAUX 2. (Rouelle, 1999)	
1993	<i>Federal Highway Administration (FHWA)</i> menginisiasi program nasional implementasi HPC pada jembatan di 13 negara bagian dimasukkan dalam program nasional ini (NCHRP Synthesis 441, 2013).	Sumber: (Wikipedia, 2016) Diaplikasikan pada: - Highway 199, Alabama, 2000 - Yale Avenue, Colorado, 1998 - SR-920, Georgia, 2002 - Charenton Canal Bridge, Louisiana, 1999 - 120th Street, Nebraska, 1996 - Route 3A, Bristol, New Hampshire, 1999 - Rio Puerco, New Mexico, 2000 - US-401, North Carolina, 2000 - US Route 22 near Cambridge, Ohio, 1998 - 1-29 Northbound, South Dakota, 1999 - 1-29 Southbound, South Dakota, 2000 - Porter Road, Tennessee, 2000 - Hickman Road, Tennessee, 2000 - Louetia Road, Texas, 1998 - San Angelo, Texas, 1998 - Route 40, Brookneal, Virginia, 1996 - Virginia Avenue, Richlands, Virginia, 1997 - State Route 18, Washington, 1998
1996	Penulis <i>SHRF state-of-the-art report</i> mempublikasikan dua sekuel laporan yang mencakup periode 1989 hingga 1994 (NCHRP Synthesis 441, 2013).	
1997	<i>Federal Highway Administration High Performance Concrete Technology Delivery</i>	

Tahun	Perkembangan Beton Kinerja Tinggi	Keterangan
	<i>Team (The FHWA HPC TDT)</i> dibentuk untuk membantu 13 negara bagian membangun jembatan HPC dan menjadi penyelenggara forum transfer teknologi melalui workshop dan studi kasus (NCHRP Synthesis 441, 2013).	
1997	<i>Sherbrooke footbridge – Canada</i> . Aplikasi beton bubuk reaktif (<i>Reactive Powder Concrete-RPC</i>) pada struktur beton paska-tarik pertama di dunia (Structurae, 1997).	
2002	Misi <i>The FHWA HPC TDT</i> diperbarui dengan fokus pada bidang penyebaran teknologi HPC (NCHRP Synthesis 441, 2013).	- Mempublikasikan <i>High Performance Concrete Struktural Designers Guide</i>. - Melakukan survey jalan raya tahun 2003-2004 dan 2006-2007.
2002	<i>Sakata Mirai Bridge</i> , Aplikasi pertama beton serat kinerja tinggi Ductal® di Jepang Sumber: (VSL, 2012)	
2002	<i>Bourg-les-Valence Bridge, France</i> Sumber: (Toutlemonde et al., 2013)	
2004	<i>Seonyu Bridge, South Korea</i> Sumber: (Lim, 2004)	
2004	<i>Shephred Creek Bridge, Australia</i> Sumber: (Ductal, 2002)	
2005	<i>PS34 Bridge, France</i> (Voo, Nematollahi, Said, Gopal, & Yee, 2012)	
2006	<i>Mars Hill Bridge, USA</i> Sumber: (Ductal, 2006)	
2008	<i>Wilson Hall, Malaysia</i> (Voo et al., 2012)	

Tahun Perkembangan Beton Kinerja Tinggi Keterangan

2008 48 m long Bridge, Japan (Voo et al., 2012)



2010 Haneda Airport Runway, Japan
Sumber: (Penta-Ocean Construction Co., 2010)



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Lampiran 2 Hasil Analisis Saringan Pasir dan Kerikil

Tabel L2. 1 Hasil Ayakan Pasir dalam Zona 3

Lubang saringan		Konversi	Zona 3		Hasil Ayakan
No	mm		Batas atas	Batas bawah	
3/8"	9,6	70		100	100
4	4,8	60		90	94,2
8	2,4	50		85	86,75
16	1,2	40	100	75	77,2
30	0,6	30	79	60	60,8
50	0,3	20	40	12	42,3
100	0,15	10	10	0	18,8
200	0,075	0			
Pan					

Tabel L2. 2 Hasil Ayakan Kerikil dalam Zona 1

Lubang saringan		Zona 1		Hasil Ayakan
No	mm	Batas atas	Batas bawah	
3"	76,2			
21/2"	63,5		100	100,00
11/2"	38,1	100	95	100,00
3/4"	19,05	70	35	88,00
3/8"	9,525	40	10	6,80
4	4,7625	5	0	0,07
8	2,4	0		
Pan				

Tabel L2. 3 Zona Gradasi Agregat Gabungan dalam Rancangan Campuran

Lubang saringan		Konversi ke grafik	Zona II (ϕ Max 19 mm)		Hasil Ayakan
No	mm		Batas atas	Batas bawah	
3/2"	38,00	90	100	100	100
3/4"	19,00	80	100	100	92
3/8"	9,60	70	75	45	41
4	4,80	60	50	30	35
8	2,40	50	42,67	22,67	32
16	1,20	40	35,33	15,33	29
30	0,60	30	28	8	23
50	0,30	20	12	4	16
100	0,15	10	6	2	7
200	0,08	0	0	0	0
Pan					

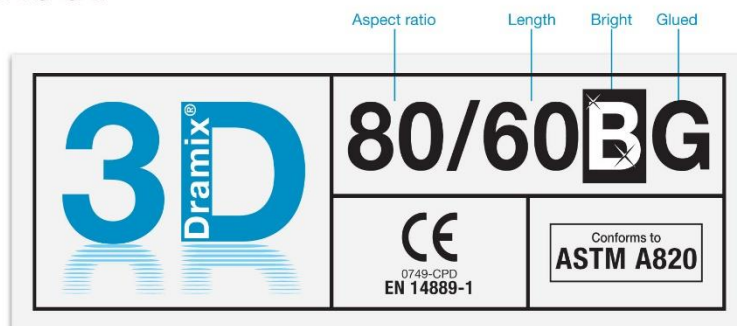
Tabel L2. 4 Dramix Data Sheet

Dramix®



better together

Data Sheet



DRAMIX® 3D



Dramix® 3D is the reference in steel fibre reinforcement. Combining high performance, durability and ease-of-use, 3D provides you with a time-saving and cost-efficient solution for most common applications.

- > original anchorage
- > standard tensile strength

Dramix® 3D is a cost efficient solution for

- > flooring
- > tunnel applications
- > precast
- > residential applications

Bekaert supplies all of the support you need for your project. We help you determine the most suitable fibre types, calculate optimal dosages, select the right concrete quality. Contact your local support.

Go to www.bekaert.com/dosingdramix for our recommendations on handling, dosing and mixing.

Modifications reserved.
All details describe our products in general form only.
For detailed information, product specifications available on request.

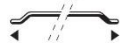
PERFORMANCE

Material properties

Tensile strength: $R_{m, nom}$: 1.225 N/mm²
Tolerances: $\pm 7,5\%$ Avg

Young's Modulus: ± 210.000 N/mm²

Geometry

Fibre family	3D	
Length (l)	60 mm	
Diameter (d)	0,75 mm	
Aspect ratio (l/d)	80	

Fibre network

2,9 km per m³ (for 10 kg/m³)
4.584 fibres/kg
Minimum dosage:
10 kg per m³ (according to CE)

Dramix® range

	5D	4D	3D
Tensile strength			
Wire ductility			
Anchorage strength			

PRODUCT CERTIFICATES



Dramix® is certified for structural use according to EN 14889-1 (system '1'). Detailed information is available on request.

SYSTEM CERTIFICATES



All Dramix® plants are ISO 9001 and ISO 14001 certified.

PACKAGING



BAGS 20 kg

BIG BAG 1100 kg

STORAGE



71.26.05 - 09/2012

Tabel L2. 5 Sika ViscoCrete® - 3115 N Data Sheet



PRODUCT DATA SHEET

Sika® ViscoCrete®-3115 N

CONCRETE ADMIXTURE FOR HIGH FLOW / SELF-COMPACTING CONCRETE

DESCRIPTION

Sika® ViscoCrete®-3115 N is a third generation super-plasticiser for concrete and mortar. It is particularly developed for the production of high flow concrete with exceptional flow retention properties.

USES

Sika® ViscoCrete®-3115 N facilitates extreme water reduction, excellent flowability with optimal cohesion and strong self-compacting behaviour.

Sika® ViscoCrete®-3115 N is used for the following types of concrete :

- High flow concrete
- Self-compacting concrete (S.C.C.)
- Concrete with very high water reduction (up to 30%)
- High strength concrete
- Watertight concrete
- Pre-cast concrete

The combination of high water reduction , excellent flowability and high early strength provides clear benefits in the above mentioned applications.

CHARACTERISTICS / ADVANTAGES

Sika® ViscoCrete®-3115 N acts by surface adsorption on the cement particles producing a sterical separation effects. Concrete produced with Sika® ViscoCrete®-3115 N exhibits the following properties :

- Excellent flowability (resulting in highly reduced placing and compacting efforts)
- Strong self-compacting behaviour
- Extremely high water reduction (resulting in high density and strengths)
- Improved shrinkage and creep behaviour
- Increased carbonation resistance of the concrete
- Improved finish

Sika® ViscoCrete®-3115 N does not contain chlorides or other ingredients which promotes steel corrosion. Therefore, it may used without restriction for reinforced and pre-stressed concrete construction.

Sika® ViscoCrete®-3115 N gives the concrete extended workability and depending on the mix design and the quality of materials used, self-compacting properties can be maintained for more than 1 hour at 30 °C.

PRODUCT INFORMATION

Chemical base	Aqueous solution of modified polycarboxylate copolymers	
Packaging	20 L jerrycan 200 L drum 1000 L tanks	
Appearance / Colour	Liquid / Turbid, Yellowish	
Shelf life	12 months from date of production when stored in original unopened packaging	
Storage conditions	Store in dry condition at temperature between +5 °C and +30 °C. Protect from direct sunlight and frost.	
Density	at +20 °C	1.05 ± 0.01 kg/L

Product Data Sheet
Sika® ViscoCrete®-3115 N
November 2016, Version 01.01
0213010111000001634

TECHNICAL INFORMATION

Concreting Guidance

The standard rules of good concreting practice, concerning production and placing, are to be followed.
Laboratory trials before concreting on site are strongly recommended when using a new mix design or producing new concrete components.
Fresh concrete must be cured properly and as early as possible.

APPLICATION INFORMATION

Recommended Dosage

For soft plastic concrete	0.3 – 0.8 % by weight of binder
For flowing and self compacting concrete (S.C.C.)	0.8 – 2.0 % by weight of binder

Compatibility

Sika® ViscoCrete®-3115 N may be combined with the following products:

- Plastiment® P121R
- Plastiment® VZ
- Sika® Fume
- SikaFibre®

Do not use viscocrete / viscoflow series combined with sikament series.
To produce flowing and / or self-compacting concrete, special concrete mix design is required.
Pre-trials are recommended and mandatory if combinations with the above products are required.
Please consult to our Technical Service Department.

APPLICATION INSTRUCTIONS

DISPENSING

Sika® ViscoCrete®-3115 N is added to the gauging water or simultaneously poured with it into the concrete mixer. For optimum utilisation of its high water reduction property, it is recommended to thoroughly mix the concrete at a minimal wet mixing time of 5 minutes.

The addition of the remaining gauging water (to fine tune concrete consistency) may only be started after two-thirds of the wet mixing time, to avoid surplus water in the concrete.

BASIS OF PRODUCT DATA

All technical data stated in this Data Sheet are based on laboratory tests. Actual measured data may vary due to circumstances beyond our control.

LOCAL RESTRICTIONS

Please note that as a result of specific local regulations the declared data and recommended uses for this product may vary from country to country. Please consult the local Product Data Sheet for the exact product data and uses.

ECOLOGY, HEALTH AND SAFETY

For information and advice on the safe handling, storage and disposal of chemical products, users shall refer to the most recent Safety Data Sheet (SDS) containing physical, ecological, toxicological and other safety-related data.

Product Data Sheet
Sika® ViscoCrete®-3115 N
November 2016, Version 01.01
021301011000001634



LEGAL NOTES

The information, and, in particular, the recommendations relating to the application and end-use of Sika products, are given in good faith based on Sika's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions in accordance with Sika's recommendations. In practice, the differences in materials, substrates and actual site conditions are such that no warranty in respect of merchantability or of fitness for a particular purpose, nor any liability arising out of any legal relationship whatsoever, can be inferred either from this information, or from any written recommendations, or from any other advice offered. The user of the product must test the product's suitability for the intended application and purpose. Sika reserves the right to change the properties of its products. The proprietary rights of third parties must be observed. All orders are accepted subject to our current terms of sale and delivery. Users must always refer to the most recent issue of the local Product Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied on request.

PT. Sika Indonesia
Jl. Raya Cibinong-Bekasi km.20.
 Cileungsi, Bogor 16820 - Indonesia
 Tel. +62 21 8230025
 Fax. +62 21 8230026
 Website: idn.sika.com
 email: sikacare@id.sika.com



Product Data Sheet
 Sika® ViscoCrete®-3115 N
 November 2016, Version 01.01
 021301011000001634

3 / 3

SikaViscoCrete-3115N_en_ID_(11-2016)_1_1.pdf

BUILDING TRUST



Tabel L2. 6 Sika Fume Data Sheet



PRODUCT DATA SHEET

SikaFume®

CONCRETE ADDITIVE BASED ON SILICA FUME TECHNOLOGY

DESCRIPTION

SikaFume® is a concrete additive in powder form, based on silica fume technology.

USES

SikaFume® is used in shotcrete, structural concrete, pre-cast concrete and other fields of concrete construction where high demands are imposed on the quality of fresh and hardened concrete.

CHARACTERISTICS / ADVANTAGES

SikaFume® contains extremely fine latently reactive silicic dioxide.

The presence of this substance imparts greatly improved internal cohesion and water retention in the fresh concrete. The concrete becomes extremely pliable and pumpability is substantially improved. In the hardened concrete the latently reactive silica fume forms a chemical bond with the free lime (CaOH₂). The additional formation of hydration products results in a significantly denser cement matrix.

With the use of SikaFume® the concrete will show the following properties:

- High stability of green concrete
- Highly increased durability
- Excellent frost and de-icing salt resistance if an air entraining agent is used at the same time
- Increased ultimate strengths
- Increased abrasion resistance
- Increased water tightness
- Increased gas tightness
- Reduced chloride penetration

SikaFume® does not contain any chlorides or other steel corrosion promoting substances, and can therefore be used without any restriction for reinforced and pre-stressed concrete construction.

APPROVALS / CERTIFICATES

SikaFume® confirms to EN 13263-1:2005 table 4.

PRODUCT INFORMATION

Chemical base	A blend of latently reactive ingredients.
Packaging	20 kg bag 1 000 bulk
Appearance / Colour	Powder / Grey
Shelf life	36 months shelf life from date of production if stored properly in undamaged, unopened, original sealed packaging.
Storage conditions	Storage in a dry environment, not sensitive to frost.
Density	~0.65 kg/L
Total Chloride Ion Content	< 0.3 M-%

Product Data Sheet
SikaFume®
November 2017, Version 01.01
021403031000000019

TECHNICAL INFORMATION

Concreting Guidance	The standard rules of good concreting practice, concerning production and placing, are to be followed. Laboratory trials shall be carried out before concreting on site, especially when using a new mix design or producing new concrete components. Fresh concrete must be cured properly and curing applied as early as possible.
Concrete Mix Design	When using SikaFume® a suitable mix design has to be taken into account and local material sources shall be tested.
Concrete Mixing Time	SikaFume® is added with the cement and aggregates at the batching plant before the gauging water. Optimum wet mixing time: 60 seconds.

APPLICATION INFORMATION

Recommended Dosage	5 - 10 % by weight of cement.

BASIS OF PRODUCT DATA

All technical data stated in this Data Sheet are based on laboratory tests. Actual measured data may vary due to circumstances beyond our control.

LOCAL RESTRICTIONS

Please note that as a result of specific local regulations the declared data and recommended uses for this product may vary from country to country. Please consult the local Product Data Sheet for the exact product data and uses.

ECOLOGY, HEALTH AND SAFETY

For information and advice on the safe handling, storage and disposal of chemical products, users shall refer to the most recent Safety Data Sheet (SDS) containing physical, ecological, toxicological and other safety-related data.

LEGAL NOTES

The information, and, in particular, the recommendations relating to the application and end-use of Sika products, are given in good faith based on Sika's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions in accordance with Sika's recommendations. In practice, the differences in materials, substrates and actual site conditions are such that no warranty in respect of merchantability or of fitness for a particular purpose, nor any liability arising out of any legal relationship whatsoever, can be inferred either from this information, or from any written recommendations, or from any other advice offered. The user of the product must test the product's suitability for the intended application and purpose. Sika reserves the right to change the properties of its products. The proprietary rights of third parties must be observed. All orders are accepted subject to our current terms of sale and delivery. Users must always refer to the most recent issue of the local Product Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied on request.

PT. Sika Indonesia
Jl. Raya Cibinong-Bekasi km.20.
Cileungsi, Bogor 16820 - Indonesia
Tel. +62 21 8230025
Fax. +62 21 8230026
Website: idn.sika.com
email: sikacare@id.sika.com



Product Data Sheet
SikaFume®
November 2017, Version 01.01
021403031000000019



Lampiran 3 Rancangan Proporsi Campuran Beton Kinerja Tinggi dengan Metode Volume Absolut untuk variasi W/B sebesar 0,32 hingga 0,20.

Massa benda uji	=	67 kg										
Batch ID:	MIX DESIGN SHEET											
Comp. Strength :		Mpa										
Tabel A	G _c	%	Agregat	G _{SSD}	W _{abs}	W _{tot}	%					
Cement	3.140	90%	COARSE	2.692	1.95%	1.19%	-0.76%					
silica fume	2.200	10%	FINE	2.704	0.30%	2.80%	2.50%					
				W _h = W _{tot} - W _{abs}			M = M _{SSD} (1 + w _h)					
SUPERPLASTICIZER		Msol = C x d/100	V _{liq} = (M _{sol} /(s x G _{sup}))) x 100%			Vw = V _{liq} x G _{sup} x ((100-s)/100)			Vsol = Vliq - Vw = Vliq [1 - ((100-s)/100) x Gsup)			
Spec. Gravity (G _{sup})	Solids dosage s (%)	15	E 24	F 21	G 11							
1.21	40.00	4.38	9.04			6.56			2.48			
		1	2	3	4	5 6						
MATERIALS		Content kg/m ³	Volume l/m ³	Dosage SSD Conditions kg/m ³	Water correction l/m ³	Composition						
						1 m ³	Trial Batch					
AIR	w/B = 0.32	1	2	2	2	23	25					
			140.00	140.00	140.00		121.54	3.31				
SEMEN		3	4-1	8-1	4-1	4-1	26-1	10.71				
		394	125.40	393.75		393.75						
SILICA FUME		438	4-2	8-2	4-2	4-2	26-2	1.19				
		44	19.89	43.75		43.75						
AGREGAT KASAR		5	9	5	18	17	27					
			1,075.00	399.30	1,075.00	8.20	1,066.80	29.03				
AGREGAT HALUS			13	14	20	19	28					
			297.94	805.67	(20.10)	825.77	22.47					
		PERCENT		10								
UDARA		6	%	15.00								
		1.50										
SUPER PLASTICIZER		7	%	11	15	21	V _{liq} 29	V _{liq}				
		1.00		2.48	4.38	6.56	9.04	0.25				
TOTAL			12	16	22	30						
			702.06	2,462.54	(18.46)	66.95						

Gambar L3. 1 Rancangan Campuran dengan W/B = 0,32

Massa benda uji = 67 kg											
Batch ID:		MIX DESIGN SHEET									
Comp. Strength :		Mpa									
				%							
Tabel A	G _c	%		Agregat	G _{SSD}	W _{abs}	W _{tot}		W _h		
Cement	3.14	90%		COARSE	2.69	1.95%	1.19%		-0.76%		
silica fume	2.20	10%		FINE	2.70	0.30%	2.80%		2.50%		
					W _h = W _{tot} - W _{abs}		M = M _{SSD} (1 + W _h)				
SUPERPLASTICIZER				Msol = C x d /100		V _{liq} = (M _{sol} / (s x G _{sup})) x 100%		Vw = V _{liq} x G _{sup} x ((100-s) /100)		Vsol = Vliq - Vw = Vliq [1 - ((100-s) /100) x Gsup]	
Spec. Gravity (G _{sup})	Solids dosage s (%)			15	E 24	F 21	G 11		H 11		
1.21	40.00			4.67		9.64	7.00		2.64		
				1		2		3		4	
				1		2		3		4	
MATERIALS				Content kg/m ³		Volume l/m ³		Dosage SSD Conditions kg/m ³		Water correction l/m ³	
				1 m ³		1 m ³		1 m ³		Composition	
				1 m ³		1 m ³		1 m ³		Trial Batch	
AIR	1	2	2		2	2	23		25		
	w/B = 0.30	140.00		140.00		140.00		121.76		3.31	
SEMEN	3	4-1	8-1	4-1	4-1	4-1	4-1		26-1		
		420	133.76	420.00	420.00	420.00	420.00		11.41		
SILICA FUME	467	4-2	8-2	4-2	4-2	4-2	4-2		26-2		
		47	21.21	46.67	46.67	46.67	46.67		1.27		
AGREGAT KASAR				5	9	5	18	17	27		
				1,075.00		399.30		1,075.00		8.20	
				1,075.00		1,066.80		28.99			
AGREGAT HALUS				13	14	20	19	28			
				288.08		779.03		(19.44)		798.47	
				21.70							
UDARA				PERCENT		10					
				6	%	15.00					
				1.50	%						
SUPER PLASTICIZER				7	11	15	21	24	V _{liq}	29	V _{liq}
				1.00	%	2.64	4.67	7.00	9.64	0.26	
TOTAL				12	16	22					
				711.92	2,465.36	(18.24)					
				66.94							

Gambar L3. 2 Rancangan Campuran dengan W/B = 0,30

Massa benda uji		=	67 kg															
Batch ID:					MIX DESIGN SHEET													
Comp. Strength :		Mpa																
					%													
Tabel A		G _c	%		Agregat		G _{SSD}	W _{abs}		W _{tot}		W _h						
Cement		3.140	90%		COARSE		2.692	1.95%		1.19%		-0.76%						
silica fume		2.200	10%		FINE		2.704	0.30%		2.80%		2.50%						
					W _h = W _{tot} - W _{abs}					M = M _{SSD} (1 + W _h)								
SUPERPLASTICIZER					Msol = C x d /100		V _{liq} = (M _{sol} / (s x G _{sup})) x 100%			Vw = V _{liq} x G _{sup} x ((100-s)/100)			Vsol = Vliq -Vw = Vliq [1-((100-s)/100)xGsup)					
Spec. Gravity (G _{sup})		Solids dosage s (%)		15	E 24		F 21			G 11			I 1					
1.21		40.00		5.00	10.33			7.50			2.83							
					1		2		3		4		5		6			
MATERIALS					Content kg/m ³		Volume l/m ³		Dosage SSD Conditions kg/m ³		Water correction l/m ³		Composition					
													1 m3		Trial Batch			
AIR		1		2			2	2				23	25					
		w/B = 0.28		140.00		140.00		140.00				122.02		3.31				
				3	4-1		8-1	4-1				4-1	26-1					
SEMEN				450		143.31		450.00				450.00		12.21				
				500		4-2		8-2	4-2				4-2	26-2				
SILICA FUME				50		22.73		50.00				50.00		1.36				
AGREGAT KASAR					5		9		5		18		17	27				
					1,075.00		399.30		1,075.00		8.20		1,066.80		28.95			
AGREGAT HALUS					13		14		20		19		28		20.82			
					276.83		748.58		(18.68)		767.26							
UDARA					PERCENT		10											
					6		15.00											
					1.50		%											
SUPER PLASTICIZER					7		11		15		21		24	V _{liq} 29		V _h		
					1.00		2.83		5.00		7.50		10.33		0.28			
TOTAL					12		16		22						30			
					723.17		2,468.58		(17.98)						66.94			

Mix Weight	=	67 kg										
Batch ID:		MIX DESIGN SHEET										
Comp. Strength :		Mpa										
Table A		G _c	%	Aggregate		G _{SSD}	w _{abs}	w _{tot}	%			
Cement		3.140	90%	COARSE		2.692	1.95%	1.19%			-0.76%	
silica fume		2.200	10%	FINE		2.704	0.30%	2.80%			2.50%	
				w _h = w _{tot} - w _{abs}				M = M _{SSD} (1 + w _h)				
SUPERPLASTICIZER			Msol = C x d/100	V _{liq} = (M _{sol} / (sxG _{sup})) x 100%			Vw = V _{liq} x G _{sup} x ((100-s)/100)			Vsol = Vliq - Vw = Vliq [1 - ((100-s)/100)xGsup]		
Spec. Gravity (G _{sup})	Solids dosage s (%)	15	E 24				F 21	G 11			H	
1.21	40.00		5.38				11.13	8.08			3.05	
			1	2	3	4	5		6			
MATERIALS		Content kg/m ³	Volume l/m ³	Dosage SSD Conditions kg/m ³		Water correction l/m ³	Composition					
							1 m3	Trial Batch				
WATER	1	2	2	2	2	23	25					
w/B = 0.26		140.00	140.00	140.00		122.32	3.31					
CEMENT	3	4-1	8-1	4-1	4-1	4-1	26-1					
		485	154.34	484.62		484.62	13.13					
SILICA FUME	538	4-2	8-2	4-2	4-2	4-2	26-2					
		54	24.48	53.85		53.85	1.46					
COARSE AGGREGATE	5	9	5	18	17	27						
		1,075.00	399.30	1,075.00	8.20	1,066.80	28.91					
FINE AGGREGATE		13	14	20	19	28						
		263.84	713.46	(17.80)	731.26	19.82						
AIR		PERCENT	10									
6		%	15.00									
1.50												
SUPERPASTICIZER	7	11	15	21	24	V _{liq}	29	V _{liq}				
1.00		%	3.05	5.38	8.08	11.13	0.30					
TOTAL		12	16	22	30							
		736.16	2,472.30	(17.68)	66.94							

Gambar L3. 4 Rancangan Campuran dengan W/B = 0,26



UNIVERSITAS
BRAWIJAYA

Gambar L3. 5 Rancangan Campuran dengan W/B = 0,23

Massa benda uji =		162.78 kg										
Batch ID:			MIX DESIGN SHEET									
Comp. Strength :		Mpa										
Tabel A		G _c	%	Agregat				G _{SSD}	W _{abs}	W _{tot}	w _h	
Cement		3.140	90%	COARSE				2.692	1.95%	1.19%	-0.76%	
silica fume		2.200	10%	FINE				2.704	0.30%	2.80%	2.50%	
				w _h = W _{tot} -W _{abs}				M=M _{SSD} (1+w _h)				
SUPERPLASTICIZER			Msol = C x d/100	V _{liq} = (M _{sol} / (sxG _{sup})) x 100%			Vw = V _{liq} x G _{sup} x ((100-s)/100)			Vsol = Vliq-Vw = Vliq [1-((100-s)/100)xGsup]		
Spec. Gravity (G _{sup})	Solids dosage s (%)	15	E 24	F 21			G 11			H		
1.21	40.00	7.00	14.46	10.50			3.96					
			1	2	3	4	5	6				
MATERIALS		Content kg/m ³	Volume l/m ³	Dosage SSD Conditions kg/m ³		Water correction l/m ³	Composition					
							1 m3	Trial Batch				
AIR	1	2	2	2	2	23	25					
w/B = 0.20		140.00	140.00	140.00		123.58	8.09					
SEMEN	3	4-1	8-1	4-1	4-1	4-1	26-1					
		630	200.64	630.00		630.00	41.22					
SILICA FUME	700	4-2	8-2	4-2	4-2	4-2	26-2					
		70	31.82	70.00		70.00	4.58					
AGREGAT KASAR	5	9	5	18	17	27						
		1,075.00	399.30	1,075.00	8.20	1,066.80	69.80					
AGREGAT HALUS		13	14	20	19	28						
		209.28	565.92	(14.12)	580.04	37.95						
UDARA	6	PERCENT	10									
	1.50	%	15.00									
SUPER PLASTICIZER	7	11	15	21	24	V _{liq} 29	V _{liq}					
	1.00	%	3.96	7.00	10.50	14.46	0.95					
TOTAL		12	16	22		30						
		790.72	2,487.92	(16.42)		162.58						

Gambar L3. 6 Rancangan Campuran dengan W/B = 0,20

Lampiran 4 Rancangan Proporsi Campuran Beton Kinerja Tinggi dengan Metode Volume Absolut untuk variasi kadar silika fume sebesar 0% hingga 15% dari berat semen.

Massa benda uji		=	163.49 kg	
Batch ID:		MIX DESIGN SHEET		
Comp. Strength :		Mpa		
Tabel A		G _c	%	
Cement		3.140	100%	
silica fume		2.200	0%	
		Agregat		G _{SSD}
		W _{abs}		W _{tot}
		COARSE		2.692
		FINE		2.704
		W _h = W _{tot} - W _{abs}		M = M _{SSD} (1 + W _h)
SUPERPLASTICIZER				
Spec. Gravity		Solids dosage	Msol = C x d /100	
(G _{sup})		s (%)	E 24	
1.21		40.00	6.09	

Gambar L4. 1 Rancangan Campuran dengan kadar silika fume 0% dari berat semen

Gambar L4. 2 Rancangan Campuran dengan kadar silika fume 5% dari berat semen

Massa benda uji	=	163.49	kg							
Batch ID:				MIX DESIGN SHEET						
Comp. Strength :		Mpa								
				%						
Tabel A		G _c	%	Agregat	G _{SSD}	W _{abs}	W _{tot}	W _h		
Cement		3.140	90%	COARSE	2.692	1.95%	1.19%	-0.76%		
silica fume		2.200	10%	FINE	2.704	0.30%	2.80%	2.50%		
W _h = W _{tot} -W _{abs}					M=M _{SSD} (1+W _h)					
SUPERPLASTICIZER			Msol = C x d/100	V _{liq} = (M _{sol} /((sxG _{sup})) x 100%		Vw = V _{liq} x G _{sup} x ((100-s)/100)		Vsol = Vliq-Vw = Vliq [1-((100-s)/100)xGsup]		
Spec. Gravity (G _{sup})	Solids dosage s (%)	15	E 24	F 21			G 11			
1.21	40.00	6.09	12.58	9.13			3.45			
			1	2	3	4	5	6		
MATERIALS			Content kg/m ³	Volume l/m ³	Dosage SSD Conditions kg/m ³	Water correction l/m ³	Composition 1 m3 Trial Batch			
AIR	w/B = 0.23	2	2	2	23	25				
		140.00	140.00	140.00			120.42	7.94		
SEMEN	3	4-1	8-1	4-1			4-1	26-1		
	609	548	174.47	547.83			547.83	36.12		
SILICA FUME		4-2	8-2	4-2	4-2	26-2				
		61	27.67	60.87	60.87	4.01				
AGREGAT KASAR		5	9	5	18	17	27			
		1,000.00	371.45	1,000.00	7.63	992.37	65.43			
AGREGAT HALUS		13	14	20	19	28				
		267.97	724.65	(18.08)	742.73	48.97				
UDARA		PERCENT	10							
		6	15.00							
SUPER PLASTICIZER		7	11	15	21	24	V _{liq} 29	V _{liq}		
		1.00	3.45	6.09	9.13	12.58	0.83			
TOTAL		12	16	22				30		
		732.03	2,479.43	(19.58)				163.31		

Gambar L4. 3 Rancangan campuran dengan kadar silika fume 10% dari berat semen

Massa benda uji =		163.49 kg											
Batch ID:				MIX DESIGN SHEET									
Comp. Strength :		0 Mpa											
				%									
Tabel A		G _c	%	Agregat		G _{SSD}		w _{abs}		w _{tot}		w _h	
Cement		3.140	85%	COARSE		2.692		1.95%		1.19%		-0.76%	
silica fume		2.200	15%	FINE		2.704		0.30%		2.80%		2.50%	
				w _h = w _{tot} - w _{abs}				M = M _{SSD} (1 + w _h)					
SUPERPLASTICIZER				Msol = C x d/100		V _{liq} = (M _{sol} /((sxG _{sup})) x 100%		Vw = V _{liq} x G _{sup} x ((100-s)/100)		Vsol = Vliq - Vw = Vliq [1 - ((100-s)/100)xGsup]			
Spec. Gravity (G _{sup})		Solids dosage s (%)		15		E 24		F 21		G 11		H	
1.21		40.00		6.09		12.58		9.13		3.45			
				1		2		3		4		5	
				6									
MATERIALS		Content kg/m ³		Volume l/m ³		Dosage SSD Conditions kg/m ³		Water correction l/m ³		Composition			
										1 m ³		Trial Batch	
AIR		1		2		2		2		23		25	
w/B =		0.23		140.00		140.00		140.00		120.70		7.99	
		3		4-1		8-1		4-1		4-1		26-1	
SEMEN		517		164.77		517.39		517.39		517.39		34.27	
		609		8-2		4-2		4-2		4-2		26-2	
SILICA FUME		91		41.50		91.30		91.30		91.30		6.05	
AGREGAT KASAR		5		9		5		18		17		27	
		1,000.00		371.45		1,000.00		7.63		992.37		65.73	
AGREGAT HALUS		13		14		20		19		28			
		263.83		713.45		(17.80)		731.25		48.44			
UDARA		PERCENT		10									
6		%		15.00									
1.50													
SUPER PLASTICIZER		7		11		15		21		24		29	
		1.00		3.45		6.09		9.13		12.58		0.83	
TOTAL		12		16		22						30	
		736.17		2,468.23		(19.30)						163.31	

Gambar L4. 4 Rancangan campuran dengan kadar silica fume 15% dari berat semen

UNIVERSITAS
BRAWIJAYA

Gambar L5. 1 Rancangan campuran pembuatan spesimen uji kadar serat

Massa benda uji		=	244.46 kg						
Batch ID:		MIX DESIGN SHEET							
Comp. Strength :		Mpa							
Tabel A		G _c	%	Agregat		G _{SSD}	w _{abs}	w _{tot}	w _h
Cement		3.150	90%	COARSE		2.692	1.95%	1.19%	-0.76%
silica fume		2.200	10%	FINE		2.704	0.30%	2.80%	2.50%
				w _h = w _{tot} - w _{abs}			M = M _{SSD} (1 + w _h)		
SUPERPLASTICIZER		Msol = C x d/100		V _{liq} = (M _{sol} /((sxG _{sup})) x 100%		Vw = V _{liq} x G _{sup} x ((100-s)/100)		Vsol = Vliq - Vw = Vliq [1 - ((100-s)/100)xGsup]	
Spec. Gravity (G _{sup})	Solids dosage s (%)	15	E 24	F 21	G 11	H			
1.21	40.00	6.09	12.58	9.13	3.45				
		1	2	3	4	5		6	
MATERIALS		Content kg/m ³		Volume l/m ³		Dosage SSD Conditions kg/m ³		Water correction l/m ³	
AIR	1	2	2	2	2	23		25	
w/B =	0.23	140.00		140.00		140.00		120.38	
SEMEN	3	4-1	8-1	4-1	547.83	4-1		26-1	
SILICA FUME	609	4-2	8-2	4-2	60.87	4-2		26-2	
AGREGAT KASAR	5	9		5	18	17		27	
AGREGAT HALUS		13		14	20	19		28	
UDARA	6	PERCENT		10					
	1.50	%		15.00					
SUPER PLASTICIZER	7	11		15	21	V _{liq}		29	
	1.00	%		3.45	6.09	9.13		12.58	
TOTAL		12		16	22			30	
		731.47		2,480.93	(19.62)			244.20	

Gambar L5. 2 Rancangan campuran pembuatan benda uji pelat satu arah

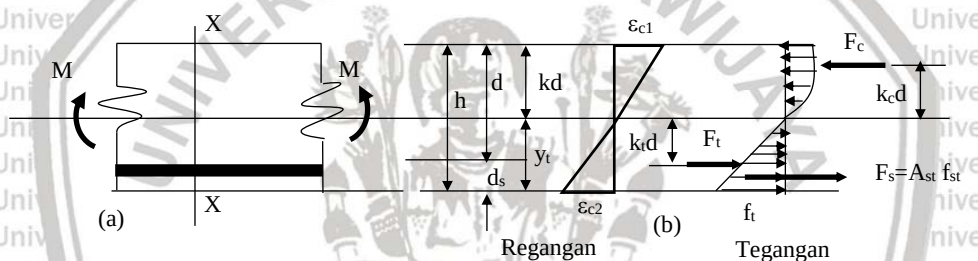
Lampiran 6 Analisis Gaya Dalam Pelat HPFRC

Tabel L6. 1 Data Geometri Pelat HPFRC

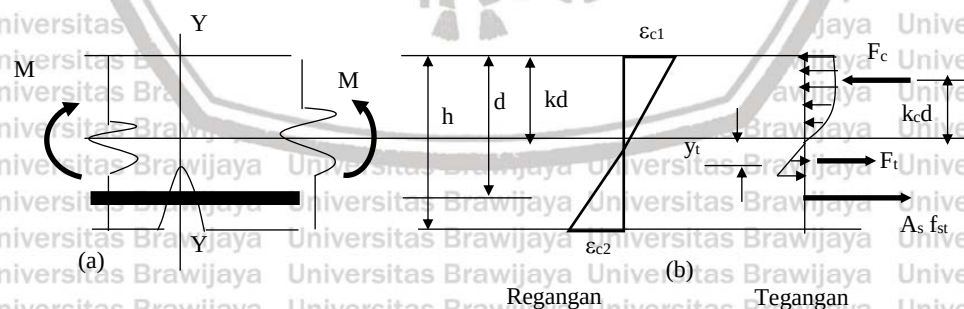
Pelat	b	h	d	ϕ	jml	A_{st}
	mm	mm	mm	mm	bh	mm ²
HPFRC-1	900	80	60	10	7	520,49
HPFRC-2	900	80	60	10	7	520,49
HPFRC-3	900	80	60	10	7	520,49
HPFRC-4	900	80	60	10	7	520,49

Tabel L6. 2 Data Sifat Mekanik Beton HPFRC

Pelat	f'_c	f_r	E_{ct}	f_y	E_s	ϵ_0	ϵ_u
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa		
HPFRC-1	54,35	6,93	54.350,0	459,37	199.182,32	0,002	0,0038
HPFRC-2	55,49	7,00	55.490,0	459,37	199.182,32	0,002	0,0038
HPFRC-3	60,68	7,32	60.680,0	459,37	199.182,32	0,002	0,0038
HPFRC-4	67,67	7,73	67.670,0	459,37	199.182,32	0,002	0,0038



Gambar L6. 1 Distribusi tegangan dan regangan pelat tidak retak. (a) bagian pelat tidak retak; (b) distribusi tegangan-regangan pada penampang X-X



Gambar L6. 2 Distribusi tegangan - regangan pada penampang retak pelat. (a) Penampang retak pelat; (b) distribusi tegangan-regangan pada penampang Y-Y

Tabel L6. 3 Persamaan untuk Menghitung Gaya Dalam

1	Sebelum Retak
$\Phi(\varepsilon_c) = f'_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \text{ MPa jika } \varepsilon_c \leq \varepsilon_0$ $\Phi(\varepsilon_c) = f'_c - 0,83f'_c (\varepsilon_c - \varepsilon_0) \text{ MPa jika } \varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_u$ $F_c = \int_{y=0}^{y=kd} b \Phi(\varepsilon(y)) dy$ $F_t = \int_{y_t=0}^{y_t=h-kd} b \left(E_{ct} \frac{\varepsilon_{c1}}{kd} y_t \right) dy_t$ $F_c k_c d = \int_{y=0}^{y=kd} b \Phi(\varepsilon(y)) y dy$ $\varepsilon(y) = \frac{y}{kd} \varepsilon_{c1}$ $\left(\varepsilon_{st} = \frac{(d-kd)}{kd} \varepsilon_c \right)$ $E_{ct} = 1000 f'_c$ $\varepsilon_{cr} = \frac{f_{ct}}{E_{ct}}$ $y_t = h - kd$ $f_{st} = E_s \left[\frac{d-kd}{kd} \right] \varepsilon_{c1}$ $F_c = F_t + A_{st} f_{st}$ $M = F_c k_c d + F_t y_t + A_{st} f_{st} (d - kd)$ $\varphi = \frac{\varepsilon_c}{kd}$ $k_t d = \frac{2}{3} (h - kd)$	
2	Saat Terjadi Retak (M_{cr})
$f_r = 0,94 \sqrt{f'_c} \text{ MPa untuk } 21 \text{ MPa} < f'_c < 88 \text{ MPa}$ $\varepsilon_{c2} = \frac{f_r}{E_{ct}}$ $y_t = \frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_c} kd$ $h' = kd + y_t \text{ (tebal pelat beton tidak retak)}$ $f_{ct} = \frac{h-kd}{kd} \Phi(\varepsilon_c)$ $kd = \left[\frac{\varepsilon_{c1}}{\varepsilon_{c1} + \varepsilon_{c2}} \right] h$ $M_{cr} = F_c k_c d + F_t y_t + A_{st} f_{st} (d - kd)$	
3	Setelah Retak Pertama Hingga Baja Mencapai Nilai f_y
$f_{ct} = f_r$ $y_t = k_t \cdot d$ $y_t = \frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_c} \cdot kd$ $F_t = \int_{y_t=0}^{y_t=\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_c} \cdot kd} b \left(E_{ct} \frac{\varepsilon_{c1}}{kd} y_t \right) dy_t$ $\varepsilon_{c1} = \left[\frac{kd}{d-kd} \right] \frac{f_{st}}{E_s}$ $k_t d = \frac{2}{3} \left(\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon(y)} \cdot kd \right)$	
4	Paska baja leleh ($f_s > f_y$) Hingga Tegangan Tekan Beton Mencapai f'_c
$(f_{st} = f_y)$	
5	Paska Tegangan Tekan Beton ($\Phi(\varepsilon(y)) > f'_c$)
$\Phi(\varepsilon_c) = f'_c - 0,83f'_c (\varepsilon_c - \varepsilon_0)$	

Tabel L6. 4 Analisis Gaya Dalam pada Penampang Pelat HPFRC-1

ε_{ci}	kd	f_{ct}	ε_{cr}	y_t	f_c	f_{st}	ε_s	F_{st}	F_c	F_t	M	ϕ
$\times 10^{-4}$	mm	MPa	$\times 10^{-4}$	mm	MPa	MPa	$\times 10^{-4}$	kN	kN	kN	kN-m	$\times 10^{-6}$
0,08	33,61	0,61	0,11	46,29	0,45	1,28	0,06	0,67	13,46	12,80	0,640	0,00
0,11	33,61	0,80	0,15	46,27	0,58	1,68	0,08	0,87	17,60	16,72	0,836	0,00
0,21	33,58	1,56	0,29	46,17	1,13	3,27	0,16	1,70	34,09	32,39	1,620	0,01
0,31	33,56	2,32	0,43	46,08	1,68	4,88	0,24	2,54	50,63	48,09	2,405	0,01
0,41	33,54	3,08	0,57	45,98	2,22	6,50	0,33	3,38	67,14	63,76	3,190	0,01
0,52	33,52	3,85	0,71	45,88	2,77	8,14	0,41	4,23	83,65	79,42	3,975	0,02
0,54	33,51	4,04	0,74	45,86	2,91	8,55	0,43	4,45	87,78	83,33	4,171	0,02
0,62	33,49	4,61	0,85	45,79	3,32	9,79	0,49	5,10	100,16	95,06	4,760	0,02
0,65	33,49	4,81	0,88	45,76	3,46	10,21	0,51	5,31	104,28	98,97	4,96	0,02
2,31	11,41	6,93	1,28	6,29	11,85	196,25	9,85	102,15	121,75	19,61	5,740	0,20
2,39	11,37	6,93	1,28	6,07	12,20	203,46	10,21	105,90	124,83	18,93	5,936	0,21
2,46	11,33	6,93	1,28	5,87	12,55	210,64	10,58	109,64	127,94	18,30	6,133	0,22
2,53	11,29	6,93	1,28	5,68	12,90	217,80	10,93	113,36	131,07	17,71	6,329	0,22
2,56	11,28	6,93	1,28	5,61	13,04	220,65	11,08	114,85	132,34	17,49	6,407	0,23
2,61	11,26	6,93	1,28	5,50	13,25	224,93	11,29	117,07	134,24	17,16	6,525	0,23
2,68	11,23	6,93	1,28	5,34	13,60	232,05	11,65	120,78	137,43	16,65	6,721	0,24
2,71	11,22	6,93	1,28	5,27	13,74	234,89	11,79	122,26	138,71	16,45	6,800	0,24
2,76	11,20	6,93	1,28	5,18	13,95	239,15	12,01	124,48	140,64	16,16	6,918	0,25
2,83	11,18	6,93	1,28	5,04	14,30	246,24	12,36	128,16	143,87	15,70	7,114	0,25
2,89	11,16	6,93	1,28	4,92	14,58	251,90	12,65	131,11	146,47	15,35	7,271	0,26
2,91	11,16	6,93	1,28	4,90	14,65	253,31	12,72	131,85	147,12	15,27	7,310	0,26
2,98	11,14	6,93	1,28	4,77	15,00	260,38	13,07	135,52	150,39	14,86	7,506	0,27
3,06	11,13	6,93	1,28	4,64	15,34	267,43	13,43	139,20	153,67	14,47	7,703	0,27
3,29	11,09	6,93	1,28	4,31	16,39	288,52	14,49	150,17	163,60	13,43	8,290	0,30
3,32	11,09	6,93	1,28	4,25	16,56	292,05	14,66	152,01	165,27	13,26	8,389	0,30
3,36	11,08	6,93	1,28	4,20	16,74	295,57	14,84	153,84	166,95	13,11	8,487	0,30
3,59	11,06	6,93	1,28	3,93	17,78	316,63	15,90	164,80	177,04	12,24	9,076	0,32
3,67	11,06	6,93	1,28	3,84	18,13	323,64	16,25	168,45	180,43	11,98	9,272	0,33
3,75	11,06	6,93	1,28	3,76	18,47	330,64	16,60	172,10	183,82	11,72	9,469	0,34
4,07	11,05	6,93	1,28	3,47	19,85	358,63	18,01	186,66	197,47	10,81	10,253	0,37
4,39	11,06	6,93	1,28	3,22	21,22	386,59	19,41	201,22	211,24	10,03	11,037	0,40
4,47	11,06	6,93	1,28	3,16	21,57	393,62	19,76	204,87	214,72	9,85	11,234	0,40
4,55	11,07	6,93	1,28	3,10	21,91	400,61	20,11	208,51	218,19	9,67	11,431	0,41
4,63	11,07	6,93	1,28	3,05	22,25	407,60	20,46	212,15	221,66	9,51	11,627	0,42
4,68	11,07	6,93	1,28	3,02	22,47	412,07	20,69	214,48	223,88	9,40	11,752	0,42

Tabel L6. 5 Analisis Gaya Dalam pada Penampang Pelat HPFRC-2

ε_{c1}	kd	f_{ct}	ε_{cr}	y_t	f_c	f_{st}	ε_s	F_{st}	F_c	F_t	M	ϕ
$\times 10^{-4}$	mm	MPa	$\times 10^{-4}$	mm	MPa	MPa	$\times 10^{-4}$	kN	kN	kN	kN-m	$\times 10^{-6}$
0,08	33,60	0,62	0,11	46,30	0,45	1,26	0,06	0,66	13,50	12,84	0,641	0,00
0,11	33,60	0,81	0,15	46,28	0,58	1,65	0,08	0,86	17,63	16,77	0,838	0,00
0,20	33,57	1,56	0,28	46,19	1,13	3,21	0,16	1,67	34,17	32,50	1,624	0,01
0,31	33,55	2,33	0,42	46,09	1,68	4,79	0,24	2,49	50,73	48,24	2,411	0,01
0,41	33,53	3,09	0,56	46,00	2,23	6,37	0,32	3,32	67,20	63,88	3,193	0,01
0,51	33,51	3,85	0,69	45,90	2,77	7,98	0,40	4,15	83,68	79,53	3,977	0,02
0,61	33,49	4,60	0,83	45,81	3,31	9,55	0,48	4,97	99,77	94,80	4,742	0,02
1,93	11,66	7,00	1,26	7,61	10,20	159,58	8,01	83,06	107,05	23,99	4,761	0,17
2,00	11,57	7,00	1,26	7,29	10,56	167,00	8,38	86,92	109,89	22,97	4,957	0,17
2,65	11,12	7,00	1,26	5,30	13,73	231,93	11,64	120,72	137,41	16,69	6,724	0,24
2,72	11,10	7,00	1,26	5,14	14,08	239,02	12,00	124,41	140,61	16,20	6,920	0,25
2,80	11,07	7,00	1,26	5,00	14,43	246,10	12,36	128,09	143,84	15,75	7,116	0,25
2,83	11,06	7,00	1,26	4,94	14,59	249,22	12,51	129,72	145,27	15,55	7,203	0,26
2,87	11,05	7,00	1,26	4,86	14,78	253,14	12,71	131,76	147,07	15,31	7,311	0,26
2,94	11,04	7,00	1,26	4,73	15,14	260,22	13,06	135,44	150,35	14,90	7,508	0,27
3,02	11,02	7,00	1,26	4,61	15,49	267,27	13,42	139,11	153,62	14,51	7,705	0,27
3,09	11,01	7,00	1,26	4,49	15,84	274,31	13,77	142,78	156,92	14,15	7,901	0,28
3,17	11,00	7,00	1,26	4,38	16,19	281,34	14,12	146,43	160,23	13,80	8,097	0,29
3,63	10,95	7,00	1,26	3,81	18,30	323,41	16,24	168,33	180,34	12,01	9,274	0,33
3,70	10,95	7,00	1,26	3,73	18,64	330,39	16,59	171,97	183,72	11,76	9,470	0,34
3,77	10,95	7,00	1,26	3,67	18,93	336,12	16,88	174,95	186,51	11,56	9,631	0,34
3,78	10,95	7,00	1,26	3,65	18,99	337,38	16,94	175,60	187,12	11,52	9,666	0,35
3,86	10,95	7,00	1,26	3,58	19,34	344,36	17,29	179,24	190,52	11,28	9,862	0,35
3,94	10,94	7,00	1,26	3,51	19,69	351,38	17,64	182,89	193,95	11,06	10,059	0,36
4,01	10,94	7,00	1,26	3,44	20,04	358,36	17,99	186,52	197,36	10,84	10,255	0,37
4,05	10,94	7,00	1,26	3,41	20,19	361,44	18,15	188,12	198,87	10,75	10,341	0,37
4,09	10,94	7,00	1,26	3,37	20,39	365,35	18,34	190,16	200,80	10,63	10,451	0,37
4,17	10,95	7,00	1,26	3,31	20,73	372,34	18,69	193,80	204,24	10,43	10,648	0,38
4,25	10,95	7,00	1,26	3,25	21,08	379,34	19,04	197,44	207,68	10,24	10,844	0,39
4,33	10,95	7,00	1,26	3,19	21,42	386,29	19,39	201,06	211,12	10,06	11,039	0,40
4,33	10,95	7,00	1,26	3,19	21,43	386,40	19,40	201,12	211,17	10,05	11,042	0,40
4,41	10,95	7,00	1,26	3,13	21,77	393,26	19,74	204,69	214,57	9,88	11,235	0,40
4,49	10,96	7,00	1,26	3,08	22,11	400,26	20,10	208,33	218,04	9,70	11,432	0,41
4,74	10,97	7,00	1,26	2,92	23,21	422,46	21,21	219,89	229,08	9,19	12,056	0,43
4,76	10,97	7,00	1,26	2,91	23,27	423,86	21,28	220,62	229,78	9,16	12,095	0,43
4,78	10,97	7,00	1,26	2,89	23,36	425,70	21,37	221,57	230,69	9,12	12,147	0,44
4,78	10,97	7,00	1,26	2,89	23,36	425,70	21,37	221,57	230,69	9,12	12,147	0,44
4,77	10,97	7,00	1,26	2,90	23,31	424,56	21,32	220,98	230,13	9,15	12,115	0,43
4,87	10,98	7,00	1,26	2,84	23,73	433,11	21,74	225,43	234,40	8,96	12,355	0,44
4,81	10,97	7,00	1,26	2,88	23,49	428,35	21,51	222,95	232,02	9,06	12,221	0,44
4,79	10,97	7,00	1,26	2,89	23,41	426,67	21,42	222,08	231,18	9,10	12,174	0,44
4,76	10,97	7,00	1,26	2,91	23,27	423,72	21,27	220,54	229,71	9,16	12,091	0,43
4,81	10,97	7,00	1,26	2,88	23,50	428,49	21,51	223,02	232,09	9,06	12,225	0,44

Tabel L6. 6 Analisis Gaya Dalam pada Penampang Pelat HPFRC-3

ε_{cl}	kd	f_{ct}	ε_{cr}	y_t	f_c	f_{st}	ε_s	F_{st}	F_c	F_t	M	ϕ
$\times 10^{-4}$	mm	MPa	$\times 10^{-4}$	mm	MPa	MPa	$\times 10^{-4}$	kN	kN	kN	kN-m	$\times 10^{-6}$
0,07	33,56	0,62	0,10	46,35	0,45	1,16	0,06	0,60	13,52	12,92	0,643	0,00
0,10	33,56	0,81	0,13	46,33	0,58	1,52	0,08	0,79	17,65	16,86	0,839	0,00
0,21	33,53	1,76	0,29	46,22	1,27	3,30	0,17	1,72	38,29	36,57	1,820	0,01
0,30	33,51	2,52	0,42	46,14	1,82	4,75	0,24	2,47	54,80	52,33	2,606	0,01
0,42	33,49	3,48	0,57	46,03	2,50	6,57	0,33	3,42	75,45	72,02	3,587	0,01
0,51	33,47	4,24	0,70	45,94	3,05	8,05	0,40	4,19	91,92	87,73	4,371	0,02
0,60	33,44	5,01	0,83	45,85	3,60	9,53	0,48	4,96	108,41	103,45	5,156	0,02
0,70	33,42	5,79	0,95	45,77	4,15	11,03	0,55	5,74	124,95	119,20	5,942	0,02
0,82	33,40	6,77	1,12	45,65	4,85	12,94	0,65	6,74	145,74	139,01	6,932	0,02
0,88	33,38	7,33	1,21	45,59	5,25	14,05	0,71	7,31	157,72	150,41	7,502	0,03
2,79	10,59	7,32	1,21	4,58	15,74	259,24	13,02	134,93	150,03	15,10	7,508	0,26
2,86	10,57	7,32	1,21	4,46	16,11	266,20	13,36	138,55	153,26	14,71	7,702	0,27
3,00	10,55	7,32	1,21	4,24	16,85	280,43	14,08	145,96	159,93	13,97	8,101	0,28
3,14	10,53	7,32	1,21	4,04	17,58	294,33	14,78	153,20	166,51	13,31	8,492	0,30
3,22	10,52	7,32	1,21	3,95	17,94	301,28	15,13	156,82	169,82	13,01	8,687	0,31
3,29	10,51	7,32	1,21	3,86	18,31	308,31	15,48	160,47	173,19	12,71	8,885	0,31
3,36	10,50	7,32	1,21	3,77	18,67	315,26	15,83	164,09	176,52	12,43	9,080	0,32
3,58	10,49	7,32	1,21	3,54	19,76	336,11	16,87	174,94	186,61	11,67	9,667	0,34
3,65	10,49	7,32	1,21	3,47	20,12	343,06	17,22	178,56	189,99	11,43	9,863	0,35
3,72	10,49	7,32	1,21	3,40	20,49	350,05	17,57	182,20	193,40	11,20	10,060	0,35
3,83	10,49	7,32	1,21	3,30	21,03	360,47	18,10	187,62	198,50	10,88	10,355	0,37
3,87	10,49	7,32	1,21	3,27	21,21	363,95	18,27	189,43	200,21	10,77	10,453	0,37
3,94	10,49	7,32	1,21	3,21	21,57	370,90	18,62	193,05	203,62	10,57	10,649	0,38
4,02	10,49	7,32	1,21	3,15	21,93	377,86	18,97	196,67	207,05	10,38	10,845	0,38
4,09	10,49	7,32	1,21	3,09	22,29	384,79	19,32	200,28	210,47	10,19	11,041	0,39
4,17	10,49	7,32	1,21	3,04	22,65	391,75	19,67	203,90	213,91	10,01	11,237	0,40
4,24	10,49	7,32	1,21	2,98	23,02	398,71	20,02	207,52	217,36	9,83	11,434	0,40
4,32	10,50	7,32	1,21	2,93	23,37	405,67	20,37	211,15	220,81	9,66	11,630	0,41
4,39	10,50	7,32	1,21	2,88	23,73	412,63	20,72	214,77	224,27	9,50	11,827	0,42
4,47	10,50	7,32	1,21	2,84	24,09	419,59	21,07	218,39	227,74	9,34	12,023	0,43
4,70	10,52	7,32	1,21	2,70	25,16	440,44	22,11	229,25	238,14	8,90	12,612	0,45
4,78	10,52	7,32	1,21	2,66	25,52	447,34	22,46	232,84	241,60	8,76	12,807	0,45
4,85	10,53	7,32	1,21	2,62	25,87	454,28	22,81	236,45	245,07	8,63	13,003	0,46
4,95	10,45	7,32	1,21	2,55	26,32	459,37	23,48	239,10	247,49	8,39	13,155	0,47
4,95	10,45	7,32	1,21	2,55	26,32	459,37	23,48	239,10	247,49	8,39	13,155	0,47
5,08	10,21	7,32	1,21	2,43	26,90	459,37	24,76	239,10	247,09	8,00	13,179	0,50
4,79	10,77	7,32	1,21	2,71	25,60	459,37	21,92	239,10	248,03	8,93	13,123	0,45
5,16	10,05	7,32	1,21	2,35	27,29	459,37	25,66	239,10	246,84	7,74	13,195	0,51
5,26	9,88	7,32	1,21	2,27	27,73	459,37	26,69	239,10	246,56	7,47	13,213	0,53
5,48	9,53	7,32	1,21	2,10	28,69	459,37	29,01	239,10	246,02	6,92	13,249	0,57
5,73	9,15	7,32	1,21	1,93	29,81	459,37	31,86	239,10	245,44	6,35	13,289	0,63
5,77	9,10	7,32	1,21	1,90	29,97	459,37	32,30	239,10	245,37	6,27	13,295	0,63
6,01	8,78	7,32	1,21	1,76	31,01	459,37	35,10	239,10	244,90	5,80	13,329	0,69
6,15	8,61	7,32	1,21	1,69	31,58	459,37	36,71	239,10	244,67	5,57	13,347	0,71
6,20	8,54	7,32	1,21	1,66	31,80	459,37	37,35	239,10	244,58	5,48	13,354	0,73
6,15	8,61	7,32	1,21	1,69	31,58	459,37	36,71	239,10	244,67	5,57	13,347	0,71
6,18	8,58	7,32	1,21	1,68	31,69	459,37	37,03	239,10	244,62	5,52	13,350	0,72
6,37	8,36	7,32	1,21	1,58	32,48	459,37	39,33	239,10	244,32	5,22	13,374	0,76
6,73	7,98	7,32	1,21	1,43	33,97	459,37	43,90	239,10	243,81	4,71	13,416	0,84
7,73	7,13	7,32	1,21	1,11	37,85	459,37	57,37	239,10	242,76	3,66	13,510	1,09
7,83	7,05	7,32	1,21	1,09	38,22	459,37	58,78	239,10	242,68	3,58	13,518	1,11

Tabel L6. 7 Analisis Gaya Dalam pada Penampang Pelat HPFRC- 4

ε_{cl}	kd	f_{ct}	ε_{cr}	y_t	f_c	f_{st}	ε_s	F_{st}	F_c	F_t	M	ϕ
$\times 10^{-4}$	mm	MPa	$\times 10^{-4}$	mm	MPa	MPa	$\times 10^{-4}$	kN	kN	kN	kN-m	$\times 10^{-6}$
0,07	33,52	0,63	0,09	46,40	0,45	1,05	0,05	0,55	13,64	13,09	0,649	0,00
0,11	33,51	1,01	0,15	46,36	0,73	1,69	0,09	0,88	21,89	21,01	1,041	0,00
0,21	33,49	1,96	0,29	46,27	1,41	3,30	0,17	1,72	42,49	40,77	2,021	0,01
0,32	33,46	2,94	0,43	46,17	2,12	4,98	0,25	2,59	63,74	61,15	3,032	0,01
0,42	33,44	3,87	0,57	46,08	2,78	6,57	0,33	3,42	83,76	80,33	3,985	0,01
0,50	33,42	4,65	0,69	46,00	3,33	7,90	0,40	4,11	100,26	96,15	4,770	0,01
0,60	33,40	5,61	0,83	45,90	4,02	9,57	0,48	4,98	120,88	115,90	5,752	0,02
0,71	33,37	6,58	0,97	45,80	4,71	11,26	0,57	5,86	141,53	135,67	6,735	0,02
0,82	33,35	7,65	1,13	45,69	5,47	13,13	0,66	6,83	164,03	157,19	7,806	0,02
2,74	10,03	7,73	1,14	4,18	17,30	272,21	13,67	141,68	156,22	14,54	7,904	0,27
2,81	10,02	7,73	1,14	4,07	17,69	279,31	14,02	145,38	159,55	14,17	8,104	0,28
3,01	9,99	7,73	1,14	3,79	18,83	300,05	15,06	156,17	169,37	13,20	8,690	0,30
3,08	9,98	7,73	1,14	3,71	19,22	306,95	15,41	159,76	172,67	12,91	8,885	0,31
3,14	9,98	7,73	1,14	3,63	19,60	313,85	15,76	163,36	175,98	12,62	9,080	0,32
3,21	9,97	7,73	1,14	3,55	19,98	320,76	16,10	166,95	179,31	12,35	9,276	0,32
3,28	9,97	7,73	1,14	3,48	20,36	327,67	16,45	170,55	182,64	12,09	9,471	0,33
3,34	9,96	7,73	1,14	3,40	20,74	334,58	16,80	174,15	185,99	11,84	9,667	0,34
3,41	9,96	7,73	1,14	3,34	21,12	341,49	17,14	177,74	189,35	11,61	9,863	0,34
3,48	9,96	7,73	1,14	3,27	21,50	348,40	17,49	181,34	192,71	11,38	10,059	0,35
3,55	9,96	7,73	1,14	3,21	21,88	355,31	17,84	184,93	196,09	11,15	10,255	0,36
3,62	9,95	7,73	1,14	3,14	22,26	362,19	18,18	188,52	199,46	10,94	10,450	0,36
3,69	9,95	7,73	1,14	3,09	22,64	369,09	18,53	192,11	202,85	10,74	10,646	0,37
3,72	9,95	7,73	1,14	3,06	22,82	372,41	18,70	193,83	204,48	10,64	10,740	0,37
3,75	9,95	7,73	1,14	3,03	23,02	376,00	18,88	195,70	206,24	10,54	10,842	0,38
3,82	9,95	7,73	1,14	2,97	23,40	382,90	19,22	199,30	209,65	10,35	11,038	0,38
3,89	9,96	7,73	1,14	2,92	23,78	389,81	19,57	202,89	213,06	10,17	11,234	0,39
3,96	9,96	7,73	1,14	2,87	24,16	396,71	19,92	206,49	216,48	9,99	11,430	0,40
4,03	9,96	7,73	1,14	2,82	24,54	403,62	20,26	210,08	219,90	9,82	11,626	0,40
4,10	9,96	7,73	1,14	2,77	24,92	410,56	20,61	213,69	223,35	9,65	11,823	0,41
4,17	9,96	7,73	1,14	2,73	25,29	417,48	20,96	217,29	226,79	9,49	12,020	0,42
4,24	9,97	7,73	1,14	2,68	25,67	424,40	21,31	220,90	230,23	9,34	12,216	0,43
4,31	9,97	7,73	1,14	2,64	26,05	431,32	21,65	224,50	233,68	9,19	12,413	0,43
4,38	9,97	7,73	1,14	2,60	26,39	437,59	21,97	227,76	236,82	9,05	12,591	0,44
4,39	9,97	7,73	1,14	2,60	26,44	438,51	22,02	228,24	237,28	9,04	12,617	0,44
4,46	9,98	7,73	1,14	2,56	26,82	445,51	22,37	231,88	240,78	8,89	12,816	0,45
4,60	9,98	7,73	1,14	2,48	27,54	458,76	23,03	238,78	247,41	8,63	13,192	0,46
4,57	9,98	7,73	1,14	2,50	27,38	455,98	22,89	237,33	246,02	8,69	13,113	0,46
4,60	9,98	7,73	1,14	2,48	27,54	458,82	23,04	238,81	247,45	8,63	13,194	0,46
4,81	9,58	7,73	1,14	2,28	28,64	459,37	25,32	239,10	247,02	7,92	13,250	0,50
5,34	8,72	7,73	1,14	1,87	31,30	459,37	31,41	239,10	245,59	6,49	13,340	0,61
5,45	8,56	7,73	1,14	1,79	31,86	459,37	32,77	239,10	245,34	6,24	13,357	0,64
5,47	8,53	7,73	1,14	1,78	31,95	459,37	33,00	239,10	245,30	6,20	13,360	0,64

Lampiran 7 Beban dan Momen Inersia Efektif Pelat

Tabel L7. 1 Perhitungan Beban P dan Momen Inersia Efektif Pelat HPFRC-1

Kondisi Pelat	Momen kN-m	Bentang L m	Beban P kN	h_e mm	b mm	I_e mm ⁴
Awal	0,08	1,60	0,20	80,00	900	38.400.000
Retak 1	5,04	1,60	12,61	79,23	900	37.307.660
Retak 2	5,74	1,60	14,35	17,70	900	415.838
Retak 3	6,41	1,60	16,02	16,88	900	360.904
Retak 4	6,80	1,60	17,00	16,49	900	336.374
Retak 5	7,27	1,60	18,18	16,09	900	312.257
Retak 6	8,39	1,60	20,97	15,34	900	270.753
Retak 7	9,27	1,60	23,18	14,90	900	248.131
Retak 8	11,17	1,60	27,92	14,24	900	216.449
Runtuh	11,75	1,60	29,38	14,09	900	209.696

Tabel L7. 2 Perhitungan Beban P dan Momen Inersia Efektif Pelat HPFRC-2

Kondisi Pelat	Momen kN-m	Bentang L m	Beban P kN	h_e mm	b mm	I_e mm ⁴
Awal	0,08	1,60	0,20	80,00	900	38.400.000
Retak 1	4,74	1,60	11,86	79,30	900	37.394.499
Retak 2	6,92	1,60	17,30	16,24	900	321.166
Retak 3	7,20	1,60	18,01	16,00	900	307.205
Retak 4	7,90	1,60	19,75	15,50	900	279.088
Retak 5	9,63	1,60	24,08	14,62	900	234.131
Retak 6	10,34	1,60	25,85	14,36	900	221.880
Retak 7	11,04	1,60	27,61	14,14	900	212.027
Runtuh	12,23	1,60	30,56	13,85	900	199.199

Tabel L7. 3 Perhitungan Beban P dan Momen Inersia Efektif Pelat HPFRC-3

Kondisi Pelat	Momen kN-m	Bentang L m	Beban P kN	h_e mm	b mm	I_e mm ⁴
Awal	0,09	1,60	0,22	80,00	900	38.400.000
Retak 1	7,50	1,60	18,76	78,97	900	36.934.183
Retak 2	8,49	1,60	21,23	14,57	900	231.803
Retak 3	8,88	1,60	22,21	14,37	900	222.526
Retak 4	9,67	1,60	24,17	14,03	900	207.246
Retak 5	10,35	1,60	25,89	13,79	900	196.617
Retak 6	10,85	1,60	27,11	13,64	900	190.228
Retak 7	11,63	1,60	29,08	13,43	900	181.645
Retak 8	12,81	1,60	32,02	13,18	900	171.665
Retak 9	13,20	1,60	33,00	12,44	900	144.558
Runtuh	13,52	1,60	33,79	8,35	900	43.610

Tabel L7. 4 Perhitungan Beban P dan Momen Inersia Efektif Pelat HPFRC-3

Kondisi Pelat	Momen kN-m	Bentang L m	Beban P kN	h_e mm	b mm	I_e mm ⁴
Awal	0,10	1,60	0,24	80,00	900	38.400.000
Retak 1	7,81	1,60	19,52	79,04	900	37.031.666
Retak 2	8,89	1,60	22,22	13,69	900	192.461
Retak 3	9,09	1,60	22,71	13,60	900	188.777
Retak 4	10,07	1,60	25,17	13,22	900	173.453
Retak 5	10,75	1,60	26,87	13,01	900	165.151
Retak 6	11,24	1,60	28,11	12,87	900	160.054
Retak 7	12,03	1,60	30,07	12,69	900	153.224
Retak 8	12,59	1,60	31,48	12,57	900	149.073
Retak 9	13,19	1,60	32,98	12,47	900	145.278
Retak 10	13,26	1,60	33,14	11,86	900	125.163
Runtuh	13,40	1,60	33,51	10,32	900	82.483

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Lampiran 8 Analisis Elemen Hingga Pelat HPFRC

Tabel L8. 1 List Program Fortran

```

PROGRAM PLANE8ND
C-----
C PROGRAM PLANE STRAIN ELEMEN ISOPARAMETRIK 8 NODAL
C UNTUK SATU PIAS PADA STRUKTUR PELAT BETON
C-----
DIMENSION STG(866,866),ELAS(9),shl(3,16,8),
+shg(3,433,8),xy(2,433),ins(8,128),ids(8,433),els(3,3),
+dbb(3,18),sjac(2,2),ra(4),sa(4),detj(128),
+stes(16,16),B(3,16),gaya(2,433),Q(866),displ(4,433),X(866),
+strain(3,433),stres(3,433),teg(3,433),tegel(3,433),teymax(433),
+tegmin(433)
C --- MEMBACA DATA DAN MENYIMPAN HASIL DI FILE
OPEN(3,FILE='DATPL8ND000.IN')
OPEN(5,FILE='HSLPL8ND000.DAT')
OPEN(6,FILE='TEGPL8ND000.DAT')
OPEN(7,FILE='DEFPL8ND000.DAT')
C-----input data -----
C Masukkan data jumlah elemen
WRITE(5, '(A)') 'Jumlah elemen:'
READ(3, *) jumel
WRITE(5, *) jumel
C Masukkan data jumlah titik simpul
WRITE(5, '(A)') 'Jumlah simpul'
READ(3, *) jnod
WRITE(5, *) jnod
C Masukkan besaran nilai modulus elastisitas bahan
WRITE(5, '(A)') 'Modulus elastisitas bahan:'
READ(3, *) elas(1)
READ(3, *) elas(3)
READ(3, *) elas(4)
READ(3, *) elas(5)
READ(3, *) elas(6)
READ(3, *) elas(7)
READ(3, *) elas(8)
READ(3, *) elas(9)
WRITE(5, 25) elas(1)
WRITE(5, 25) elas(3)
WRITE(5, 25) elas(4)
WRITE(5, 25) elas(5)
WRITE(5, 25) elas(6)
WRITE(5, 25) elas(7)
25 FORMAT(F10.0)
C Masukkan Poisson Bahan
WRITE(5, '(A)') 'Angka Poisson bahan'
READ(3, *) elas(2)
WRITE(5, 30) elas(2)
30 FORMAT(F5.2)
C Masukkan vektor insiden
WRITE(5, '(A)') 'Vektor Insiden:'
DO 40 I=1, jumel
READ(3, *) (ins(J,I), J=1, 8)
WRITE(5, 35) (ins(J,I), J=1, 8)
35 FORMAT(8I5)
40 CONTINUE
WRITE(5, *)
WRITE(5, '(A)') 'tebal elemen (mm)'
READ(3, *) ts

```



```

WRITE(5,42)ts
42 FORMAT(F10.0)
WRITE(5,*)
WRITE(5,('A'))'jumlah tumpuan:'
READ(3,*)jtump
WRITE(5,*)jtump
C-----susun vektor destinasi-----
DO 60 I=1,jnod
DO 50 J=1,2
ids(J,I)=1
50 CONTINUE
60 CONTINUE
C Masukkan kekangan tumpuan
WRITE(5,('A'))'Kekangan Tumpuan:'
DO 80 M=1,jtump
READ(3,*)J,ids(1,J),ids(2,J)
WRITE(5,*)J,ids(1,J),ids(2,J)
80 CONTINUE
jpers=0
DO 120 I=1,jnod
DO 110 J=1,2
IF (ids(J,I).GT.0) THEN
jpers=jpers+1
ids(J,I)=jpers
ENDIF
110 CONTINUE
120 CONTINUE
WRITE(5,('A'))'jumlah persamaan:'
WRITE(5,*)jpers
C-----baca koordinat-----
WRITE(5,('A'))'Simpul koord-x(mm) koord-y(mm)'
DO 140 M=1,jnod
READ(3,*)(xy(I,M),I=1,2)
WRITE(5,135)M,(xy(I,M),I=1,2)
135 Format(I3,2X,2F10.1)
140 CONTINUE
C-----shape function lokal-----
ra(1)=-0.50
ra(2)=0.50
ra(3)=0.50
ra(4)=-0.50
sa(1)=-0.50
sa(2)=-0.50
sa(3)=0.50
sa(4)=0.50
G=2.0/SQRT(3.0)
do 170 L=1,4
R=G*ra(L)
S=G*sa(L)
C
shl(1,1,L)=0.25*(2*R+S)*(1-S)
shl(1,2,L)=0.25*(2*R-S)*(1-S)
shl(1,3,L)=0.25*(2*R+S)*(1+S)
shl(1,4,L)=0.25*(2*R-S)*(1+S)
shl(1,5,L)=-R*(1-S)
shl(1,6,L)=0.5*(1-S**2)
shl(1,7,L)=-R*(1+S)
shl(1,8,L)=-0.5*(1-S**2)
C
shl(2,1,L)=0.25*(1-R)*(2*S+R)

```

```

shl(2,2,L)=0.25*(1+R)*(2*S-R)
shl(2,3,L)=0.25*(1+R)*(2*S+R)
shl(2,4,L)=0.25*(1-R)*(2*S-R)
shl(2,5,L)=-0.5*(1-R**2)
shl(2,6,L)=-(1+R)*S
shl(2,7,L)=0.5*(1-R**2)
shl(2,8,L)=-(1-R)*S
C
shl(3,1,L)=0.25*(1-R)*(1-S)*(-R-S-1)
shl(3,2,L)=0.25*(1+R)*(1-S)*(R-S-1)
shl(3,3,L)=0.25*(1+R)*(1+S)*(R+S-1)
shl(3,4,L)=0.25*(1-R)*(1+S)*(-R+S-1)
shl(3,5,L)=0.5*(1-R**2)*(1-S)
shl(3,6,L)=0.5*(1+R)*(1-S**2)
shl(3,7,L)=0.5*(1-R**2)*(1+S)
shl(3,8,L)=0.5*(1-R)*(1-S**2)
C
170 continue
PAUSE
WRITE(5,*)'matriks kekakuan'
C -----matriks kekakuan-----
DO 175 I=1,jpers
DO 174 J=1,jpers
STG(I,J)=0.0
174 CONTINUE
175 CONTINUE
C
DO 700 NEL=1,jumel
C-----shape function global-----
DO 200 K=1,4
DO 190 J=1,8
DO 180 I=1,3
shg(I,ins(J,NEL),K)=shl(I,J,K)
180 CONTINUE
190 CONTINUE
200 CONTINUE
DO 300 L=1,4
DO 220 J=1,2
DO 210 I=1,2
sjac(I,J)=0.0
210 CONTINUE
220 CONTINUE
DO 250 J=1,2
DO 240 I=1,2
DO 230 K=1,8
sjac(I,J)=sjac(I,J)+shg(I,ins(K,NEL),L)*xy(J,ins(K,NEL))
230 CONTINUE
240 CONTINUE
250 CONTINUE
detj(L)=sjac(1,1)*sjac(2,2)-sjac(1,2)*sjac(2,1)
IF (detj(L).LE.0.0) THEN
WRITE(5, '(A)') 'determinan negatif pada elemen NO:'
WRITE(5,*)NEL
C
STOP
ENDIF
DO 270 J=1,2
DO 260 I=1,2
sjac(I,J)=sjac(I,J)/detj(L)
260 CONTINUE
270 CONTINUE

```



```

DO 290 I=1,8
temp=sjac(2,2)*shg(1,ins(I,NEL),L)-sjac(1,2)*shg(2,ins(I,NEL),L)
shg(2,ins(I,NEL),L)=sjac(2,1)*shg(1,ins(I,NEL),L)+
+sjac(1,1)*shg(2,ins(I,NEL),L)
shg(1,ins(I,NEL),L)=temp

```

```
290 CONTINUE
```

```
300 CONTINUE
```

```
C-----matriks elemen bahan-----
```

```
IF(NEL.GE.98.AND.NEL.LE.111)THEN
```

```
  C=elas(9)/(1-(elas(2))*(elas(2)))
```

```
ELSE
```

```
IF(NEL.GE.82.AND.NEL.LE.95)THEN
```

```
  C=elas(8)/(1-(elas(2))*(elas(2)))
```

```
ELSE
```

```
IF(NEL.GE.66.AND.NEL.LE.79)THEN
```

```
  C=elas(7)/(1-(elas(2))*(elas(2)))
```

```
ELSE
```

```
IF(NEL.GE.50.AND.NEL.LE.63)THEN
```

```
  C=elas(6)/(1-(elas(2))*(elas(2)))
```

```
ELSE
```

```
IF(NEL.GE.34.AND.NEL.LE.47)THEN
```

```
  C=elas(5)/(1-(elas(2))*(elas(2)))
```

```
ELSE
```

```
IF(NEL.GE.18.AND.NEL.LE.31)THEN
```

```
  C=elas(4)/(1-(elas(2))*(elas(2)))
```

```
ELSE
```

```
IF(NEL.GE.2.AND.NEL.LE.15)THEN
```

```
  C=elas(3)/(1-(elas(2))*(elas(2)))
```

```
ELSE
```

```
  C=elas(1)/(1-(elas(2))*(elas(2)))
```

```
ENDIF
```

```
ENDIF
```

```
ENDIF
```

```
ENDIF
```

```
ENDIF
```

```
ENDIF
```

```
ENDIF
```

```
els(1,1)=C
```

```
els(1,2)=elas(2)*C
```

```
els(1,3)=0.0
```

```
els(2,1)=els(1,2)
```

```
els(2,2)=els(1,1)
```

```
els(2,3)=0.0
```

```
els(3,1)=0.0
```

```
els(3,2)=0.0
```

```
els(3,3)=C*(1-elas(2))/2
```

```
DO 320 I=1,16
```

```
DO 310 J=1,16
```

```
  stes(I,J)=0.0
```

```
310 CONTINUE
```

```
320 CONTINUE
```

```
C-----matriks B dan DB -----
```

```
DO 450 L=1,4
```

```
DO 330 J=1,8
```

```
  JJ=ins(J,NEL)
```

```
  J2=2*J
```

```
  B(1,J2-1)=shg(1,JJ,L)
```

```
  B(1,J2)=0.0
```

```
  B(2,J2-1)=0.0
```

```
  B(2,J2)=shg(2,JJ,L)
```

```

B(3,(J2-1))=shg(2,JJ,L)
B(3,J2)=shg(1,JJ,L)
330 CONTINUE
DO 350 I=1,3
DO 340 J=1,16
dbs(I,J)=0.0
340 CONTINUE
350 CONTINUE
DO 380 I=1,3
DO 370 J=1,16
DO 360 K=1,3
dbs(I,J)=dbs(I,J)+els(I,K)*B(K,J)
360 CONTINUE
370 CONTINUE
380 CONTINUE
DO 400 I=1,3
DO 390 J=1,16
dbs(I,J)=dbs(I,J)*detj(L)*ts
390 CONTINUE
400 CONTINUE
DO 430 I=1,16
DO 420 J=1,16
DO 410 K=1,3
stes(I,J)=stes(I,J)+B(K,I)*dbs(K,J)
410 CONTINUE
420 CONTINUE
430 CONTINUE
450 CONTINUE
C ----- simpan dalam stiffness global -----
DO 660 I=1,8
DO 650 M=1,2
II=ids(M,ins(I,NEL))
IF(II.GT.0) THEN
DO 640 J=1,8
DO 630 N=1,2
JJ=ids(N,ins(J,NEL))
IF(JJ.GT.0) THEN
STG(II,JJ)=STG(II,JJ)+stes((M+(I-1)*2),(N+(J-1)*2))
ENDIF
630 CONTINUE
640 CONTINUE
ENDIF
650 CONTINUE
660 CONTINUE
700 CONTINUE
WRITE(5,('A'))'kekakuan ok '
C ----- beban luar -----
WRITE(5,*)
WRITE(5,*)'Pengisian beban '
WRITE(5,*)
DO 770 J=1,2
DO 760 I=1,jnod
gaya(J,I)=0.0
760 CONTINUE
770 CONTINUE
DO 772 I=1,jpers
Q(I)=0.0
772 continue
WRITE(5,*)' Jumlah titik beban: '

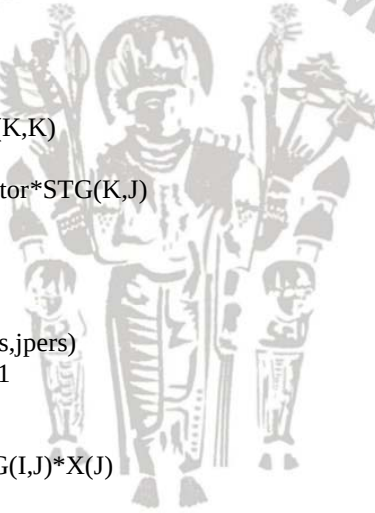
```



```

WRITE(6,*) 'Jumlah titik beban: '
WRITE(7,*) 'Jumlah titik beban: '
READ(3,*) jban
WRITE(5,*) jban
WRITE(6,*) jban
WRITE(7,*) jban
DO 780 I=1,jban
  write(5,*) 'Simpul ',Gaya (Fx)', Gaya (Fy)'
  write(6,*) 'Simpul ',Gaya (Fx)', Gaya (Fy)'
  write(7,*) 'Simpul ',Gaya (Fx)', Gaya (Fy)'
  read(3,*) j,gaya(1,j),gaya(2,j)
  WRITE(5,775)j,gaya(1,j),gaya(2,j)
  WRITE(6,775)j,gaya(1,j),gaya(2,j)
  WRITE(7,775)j,gaya(1,j),gaya(2,j)
  WRITE(6,*)
  WRITE(7,*)
775  FORMAT(I3,2X,F10.2,2X,F15.0)
780  continue
  do 800 I=1,jnod
    do 790 J=1,2
      if(ids(J,I).GT.0)then
        Q(ids(J,I))=gaya(J,I)
      endif
790  CONTINUE
800  CONTINUE
C-----eliminasi Gauss -----
  DO 830 K=1,(jpers-1)
    DO 820 I=(K+1),jpers
      faktor=STG(I,K)/STG(K,K)
      DO 810 J=(K+1),jpers
        STG(I,J)=STG(I,J)-faktor*STG(K,J)
810  CONTINUE
      Q(I)=Q(I)-faktor*Q(K)
820  CONTINUE
830  CONTINUE
    X(jpers)=Q(jpers)/STG(jpers,jpers)
    DO 850 I=(jpers-1),1,-1
      djumlah=0.0
      DO 840 J=(I+1),jpers
        djumlah=djumlah+STG(I,J)*X(J)
840  CONTINUE
      X(I)=(Q(I)-djumlah)/STG(I,I)
850  CONTINUE
C ----- perpindahan global -----
  WRITE(5,*)
  WRITE(5,*) 'Perpindahan Global'
  WRITE(5,*)
  DO 870 I=1,jnod
    DO 860 J=1,2
      IF (ids(J,I).GT.0) THEN
        displ(J,I)=X(ids(J,I))
      ELSE
        displ(J,I)=0.0
      endif
      write(5,855) 'Nodal= ',I,J=',J',ids(J,I)=',ids(J,I)',displ(J,I)=',
        +displ(J,I)
855  Format(A7,I3,2X,A3,I3,2X,A10,I3,2X,A10,F10.5)
860  CONTINUE
870  CONTINUE
C -----tinjau lenturan dan tegangan -----

```



```

WRITE(5,*)
WRITE(5,'(A)')'jumlah titik tinjau'
READ(3,*)jtin
WRITE(5,*)jtin
WRITE(5,*)
WRITE(5,'(A)')'Perpindahan Pada Titik Simpul:'
WRITE(5,*)
WRITE(5,*)'titik ','horisontal(mm)',' vertikal(mm)'
WRITE(5,*)
DO 875 M=1,jtin
WRITE(5,873)M,displ(1,M),displ(2,M)
873  FORMAT(I3,3X,F10.5,3X,F10.5)
875 CONTINUE
WRITE(7,*)
WRITE(7,'(A)')'jumlah titik tinjau ='
READ(3,*)jtin
WRITE(7,*)jtin
WRITE(7,*)
WRITE(7,'(A)')'Perpindahan Pada Titik Simpul:'
WRITE(7,*)
WRITE(7,*)'titik','Koord xy ','horisontal(mm)',' vertikal(mm)'
WRITE(7,*)
DO 879 I=1,jtin
READ(3,*)M
WRITE(7,877)M,(xy(1,M)),(xy(2,M)),displ(1,M),displ(2,M)
877  FORMAT(I3,3X,F10.0,F10.0,3X,3X,F10.3,3X,F10.5)
879 CONTINUE
C
C WRITE(6,'(A)')'ingin hitung tegangan ? ,ya=1 tidak=0'
READ(3,*)lanjut
IF(lanjut.GT.0)THEN
DO 882 I=1,3
DO 881 J=1,jnod
strain(I,J)=0.
stres(I,J)=0.
881 CONTINUE
882 CONTINUE
C
DO 960 M=1,jumel
DO 955 L=1,4
DO 900 J=1,8
JJ=ins(J,M)
J2=2*J
B(1,(J2-1))=shg(1,JJ,L)
B(1,J2)=0.0
B(2,(J2-1))=0.0
B(2,J2)=shg(2,JJ,L)
B(3,(J2-1))=shg(2,JJ,L)
B(3,J2)=shg(1,JJ,L)
900 CONTINUE
LL=ins(L,M)
do 951 LI=1,4
LLI=ins(LI,M)
DO 950 J=1,2
DO 930 I=1,3
strain(I,LL)=strain(I,LL)+B(I,(2*LI+J-2))*displ(J,LL)
930 CONTINUE
950 CONTINUE
951 CONTINUE

```



```

955 CONTINUE
960 CONTINUE
C WRITE(6,*)elm., 'ttk Gauss ', 'normal-x ', 'normal-y ', ' geser-xy',
C WRITE(5,*)
  WRITE(6,*)ELEMEN No,' TEG Maximum',' Teg Minimum'
  WRITE(5,*)EL No,' TEG arah-X',' Teg arah-Y',' Teg X-Y'
  WRITE(6,*)
  WRITE(5,*)
DO 1000 M=1,jumel
  DO 965 I=1,3
  DO 964 J=1,jnod
    stres(I,J)=0.0
    teg(I,M)=0.0
964 CONTINUE
965 CONTINUE
  DO 995 L=1,4
    LL=ins(L,M)
    DO 990 I=1,3
    DO 980 K=1,3
      stres(I,LL)=stres(I,LL)+els(I,K)*strain(K,LL)
980 CONTINUE
      stres(I,LL)=stres(I,LL)/ts
      teg(I,M)=teg(I,M)+stres(I,LL)
      tegel(I,M)=teg(I,M)/4
      tegmax(M)=+sqrt((((tegel(1,M)-tegel(2,M))/2)**2)+(tegel(3,M)**2))
      tegmax(M)=tegmax(M)+((tegel(1,M)+tegel(2,M))/2)
      tegmin(M)=-sqrt((((tegel(1,M)-tegel(2,M))/2)**2)+(tegel(3,M)**2))
      tegmin(M)=tegmin(M)+((tegel(1,M)+tegel(2,M))/2)
C    write(6,*)El No:',M,' No.Ins:',LL,' I=',I,' Teg=',stres(I,LL)
990 CONTINUE
C    WRITE(5,*)
C    WRITE(5,993)M,ins(L,M),stres(1,LL),stres(2,LL),stres(3,LL)
C 993 FORMAT(I3,4X,I3,3X,F10.3,2X,F8.3,2X,F7.3)
995 CONTINUE
C WRITE(6,*)
  WRITE(5,997)M,tegel(1,M),tegel(2,M),tegel(3,M)
997 FORMAT(I3,2X,F10.3,4X,F8.3,4X,F7.3)
C WRITE(6,*)
  WRITE(6,998)M,tegmax(M),Tegmin(M)
998 FORMAT(I3,2X,F10.3,2X,F10.3)
C WRITE(6,*)
1000 CONTINUE
ENDIF
STOP
END

```


Tabel L8. 2. Input Data Program Fortran

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
128	900	300 25	1400 50	1000 80
433		400 25	1450 50	1050 80
58365.38	2	500 25	1500 50	1100 80
58365.38	1 0 0	600 25	1550 50	1150 80
58365.38	33 1 0	700 25	1600 50	1200 80
66699.69		800 25	0 55	1250 80
66967.39	0 0	900 25	100 55	1300 80
58365.38	50 0	1000 25	200 55	1350 80
58365.38	100 0	1100 25	300 55	1400 80
58365.38	150 0	1200 25	400 55	1450 80
58365.38	200 0	1300 25	500 55	1500 80
58365.38	250 0	1400 25	600 55	1550 80
0.20	300 0	1500 25	700 55	1600 80
	350 0	1600 25	800 55	
1 3 53 51 2 35 52 34	400 0	0 30	900 55	3
3 5 55 53 4 36 54 35	450 0	50 30	1000 55	416 0 -60.69
5 7 57 55 6 37 56 36	500 0	100 30	1100 55	417 0 -121.39
7 9 59 57 8 38 58 37	550 0	150 30	1200 55	418 0 -60.69
9 11 61 59 10 39 60 38	600 0	200 30	1300 55	
11 13 63 61 12 40 62 39	650 0	250 30	1400 55	233
13 15 65 63 14 41 64 40	700 0	300 30	1500 55	9
15 17 67 65 16 42 66 41	750 0	350 30	1600 55	15
17 19 69 67 18 43 68 42	800 0	400 30	0 60	17
19 21 71 69 20 44 70 43	850 0	450 30	50 60	19
21 23 73 71 22 45 72 44	900 0	500 30	100 60	115
23 25 75 73 24 46 74 45	950 0	550 30	150 60	117
25 27 77 75 26 47 76 46	1000 0	600 30	200 60	119
27 29 79 77 28 48 78 47	1050 0	650 30	250 60	415
29 31 81 79 30 49 80 48	1100 0	700 30	300 60	417
31 33 83 81 32 50 82 49	1150 0	750 30	350 60	419
51 53 103 101 52 85 102 84	1200 0	800 30	400 60	
53 55 105 103 54 86 104 85	1250 0	850 30	450 60	1
55 57 107 105 56 87 106 86	1300 0	900 30	500 60	
57 59 109 107 58 88 108 87	1350 0	950 30	550 60	
59 61 111 109 60 89 110 88	1400 0	1000 30	600 60	
61 63 113 111 62 90 112 89	1450 0	1050 30	650 60	
63 65 115 113 64 91 114 90	1500 0	1100 30	700 60	
65 67 117 115 66 92 116 91	1550 0	1150 30	750 60	
67 69 119 117 68 93 118 92	1600 0	1200 30	800 60	
69 71 121 119 70 94 120 93	0 5	1250 30	850 60	
71 73 123 121 72 95 122 94	100 5	1300 30	900 60	
73 75 125 123 74 96 124 95	200 5	1350 30	950 60	
75 77 127 125 76 97 126 96	300 5	1400 30	1000 60	
77 79 129 127 78 98 128 97	400 5	1450 30	1050 60	
79 81 131 129 80 99 130 98	500 5	1500 30	1100 60	
81 83 133 131 82 100 132 99	600 5	1550 30	1150 60	
101 103 153 151 102 135 152 134	700 5	1600 30	1200 60	
103 105 155 153 104 136 154 135	800 5	0 35	1250 60	
105 107 157 155 106 137 156 136	900 5	100 35	1300 60	
107 109 159 157 108 138 158 137	1000 5	200 35	1350 60	
109 111 161 159 110 139 160 138	1100 5	300 35	1400 60	
111 113 163 161 112 140 162 139	1200 5	400 35	1450 60	
113 115 165 163 114 141 164 140	1300 5	500 35	1500 60	
115 117 167 165 116 142 166 141	1400 5	600 35	1550 60	
117 119 169 167 118 143 168 142	1500 5	700 35	1600 60	
119 121 171 169 120 144 170 143	1600 5	800 35	0 65	
	0 10	900 35	100 65	

Tabel L8. 2 Input Data Program Fortran

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
121 123 173 171 122 145 172 144	50 10	1000 35	200 65	
123 125 175 173 124 146 174 145	100 10	1100 35	300 65	
125 127 177 175 126 147 176 146	150 10	1200 35	400 65	
127 129 179 177 128 148 178 147	200 10	1300 35	500 65	
129 131 181 179 130 149 180 148	250 10	1400 35	600 65	
131 133 183 181 132 150 182 149	300 10	1500 35	700 65	
151 153 203 201 152 185 202 184	350 10	1600 35	800 65	
153 155 205 203 154 186 204 185	400 10	0 40	900 65	
155 157 207 205 156 187 206 186	450 10	50 40	1000 65	
157 159 209 207 158 188 208 187	500 10	100 40	1100 65	
159 161 211 209 160 189 210 188	550 10	150 40	1200 65	
161 163 213 211 162 190 212 189	600 10	200 40	1300 65	
163 165 215 213 164 191 214 190	650 10	250 40	1400 65	
165 167 217 215 166 192 216 191	700 10	300 40	1500 65	
167 169 219 217 168 193 218 192	750 10	350 40	1600 65	
169 171 221 219 170 194 220 193	800 10	400 40	0 70	
171 173 223 221 172 195 222 194	850 10	450 40	50 70	
173 175 225 223 174 196 224 195	900 10	500 40	100 70	
175 177 227 225 176 197 226 196	950 10	550 40	150 70	
177 179 229 227 178 198 228 197	1000 10	600 40	200 70	
179 181 231 229 180 199 230 198	1050 10	650 40	250 70	
181 183 233 231 182 200 232 199	1100 10	700 40	300 70	
201 203 253 251 202 235 252 234	1150 10	750 40	350 70	
203 205 255 253 204 236 254 235	1200 10	800 40	400 70	
205 207 257 255 206 237 256 236	1250 10	850 40	450 70	
207 209 259 257 208 238 258 237	1300 10	900 40	500 70	
209 211 261 259 210 239 260 238	1350 10	950 40	550 70	
211 213 263 261 212 240 262 239	1400 10	1000 40	600 70	
213 215 265 263 214 241 264 240	1450 10	1050 40	650 70	
215 217 267 265 216 242 266 241	1500 10	1100 40	700 70	
217 219 269 267 218 243 268 242	1550 10	1150 40	750 70	
219 221 271 269 220 244 270 243	1600 10	1200 40	800 70	
221 223 273 271 222 245 272 244	0 15	1250 40	850 70	
223 225 275 273 224 246 274 245	100 15	1300 40	900 70	
225 227 277 275 226 247 276 246	200 15	1350 40	950 70	
227 229 279 277 228 248 278 247	300 15	1400 40	1000 70	
229 231 281 279 230 249 280 248	400 15	1450 40	1050 70	
231 233 283 281 232 250 282 249	500 15	1500 40	1100 70	
251 253 303 301 252 285 302 284	600 15	1550 40	1150 70	
253 255 305 303 254 286 304 285	700 15	1600 40	1200 70	
255 257 307 305 256 287 306 286	800 15	0 45	1250 70	
257 259 309 307 258 288 308 287	900 15	100 45	1300 70	
259 261 311 309 260 289 310 288	1000 15	200 45	1350 70	
261 263 313 311 262 290 312 289	1100 15	300 45	1400 70	
263 265 315 313 264 291 314 290	1200 15	400 45	1450 70	
265 267 317 315 266 292 316 291	1300 15	500 45	1500 70	
267 269 319 317 268 293 318 292	1400 15	600 45	1550 70	
269 271 321 319 270 294 320 293	1500 15	700 45	1600 70	
271 273 323 321 272 295 322 294	1600 15	800 45	0 75	
273 275 325 323 274 296 324 295	0 20	900 45	100 75	
275 277 327 325 276 297 326 296	50 20	1000 45	200 75	
277 279 329 327 278 298 328 297	100 20	1100 45	300 75	
279 281 331 329 280 299 330 298	150 20	1200 45	400 75	
281 283 333 331 282 300 332 299	200 20	1300 45	500 75	
301 303 353 351 302 335 352 334	250 20	1400 45	600 75	
303 305 355 353 304 336 354 335	300 20	1500 45	700 75	
305 307 357 355 306 337 356 336	350 20	1600 45	800 75	

Tabel L8. 2. Input Data Program Fortran

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
307 309 359 357 308 338 358 337	400 20	0 50	900 75	
309 311 361 359 310 339 360 338	450 20	50 50	1000 75	
311 313 363 361 312 340 362 339	500 20	100 50	1100 75	
313 315 365 363 314 341 364 340	550 20	150 50	1200 75	
315 317 367 365 316 342 366 341	600 20	200 50	1300 75	
317 319 369 367 318 343 368 342	650 20	250 50	1400 75	
319 321 371 369 320 344 370 343	700 20	300 50	1500 75	
321 323 373 371 322 345 372 344	750 20	350 50	1600 75	
323 325 375 373 324 346 374 345	800 20	400 50	0 80	
325 327 377 375 326 347 376 346	850 20	450 50	50 80	
327 329 379 377 328 348 378 347	900 20	500 50	100 80	
329 331 381 379 330 349 380 348	950 20	550 50	150 80	
331 333 383 381 332 350 382 349	1000 20	600 50	200 80	
351 353 403 401 352 385 402 384	1050 20	650 50	250 80	
353 355 405 403 354 386 404 385	1100 20	700 50	300 80	
355 357 407 405 356 387 406 386	1150 20	750 50	350 80	
357 359 409 407 358 388 408 387	1200 20	800 50	400 80	
359 361 411 409 360 389 410 388	1250 20	850 50	450 80	
361 363 413 411 362 390 412 389	1300 20	900 50	500 80	
363 365 415 413 364 391 414 390	1350 20	950 50	550 80	
365 367 417 415 366 392 416 391	1400 20	1000 50	600 80	
367 369 419 417 368 393 418 392	1450 20	1050 50	650 80	
369 371 421 419 370 394 420 393	1500 20	1100 50	700 80	
371 373 423 421 372 395 422 394	1550 20	1150 50	750 80	
373 375 425 423 374 396 424 395	1600 20	1200 50	800 80	
375 377 427 425 376 397 426 396	0 25	1250 50	850 80	
377 379 429 427 378 398 428 397	100 25	1300 50	900 80	
379 381 431 429 380 399 430 398	200 25	1350 50	950 80	
381 383 433 431 382 400 432 399				

Lampiran 9 Tegangan Lekat pada Retakan Pertama Hingga Runtuh

Tabel L9. 1 Data Geometri dan Sifat Mekanik Pelat

Pelat	b	h	d	ϕ	jumlah	A_{st}	E_s	ρ
	mm	mm	mm	mm	bh	mm ²	MPa	
HPFRC-1	900	80	60	9,73	7	520,49	199182,32	0,0096
HPFRC-2	900	80	60	9,73	7	520,49	199182,32	0,0096
HPFRC-3	900	80	60	9,73	7	520,49	199182,32	0,0096
HPFRC-4	900	80	60	9,73	7	520,49	199182,32	0,0096

Tabel L9. 2 Tegangan Lekat (u_{bo}) dan Panjang Slip (S_o) Retak Pertama

Pelat	x	u_{bo}	S_o	u_{bx}	S_o	f_{st1}	f_{stx}	e_{s0}
	mm	Mpa	mm	Mpa	mm	MPa	MPa	mm
HPFRC-1	108,54	1,33	108,54	0	0,0012	10,39	50,00	0,0049
HPFRC-2	118,73	1,24	118,73	0	0,0011	9,55	50,00	0,0051
HPFRC-3	77,72	1,69	77,72	0	0,0014	14,05	50,00	0,0041
HPFRC-4	80,93	1,66	80,93	0	0,0041	13,13	50,00	0,0041

Tabel L9. 3 Tegangan Lekat dan Panjang Slip Pelat HPFRC-1

Kondisi	f_c'	u_{bo}	u'_{bo}	f_{s2}	f_{s3}	S	S_x	S_y	$f_{s1(1)}$	$f_{s1(2)}$
Pelat	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	mm	mm	mm	Mpa	Mpa
Retak 2	54,35	4,989	5,697	166,94	191,51	100,00	44,92	55,08	105,52	105,52
Retak 3	54,35	5,241	5,951	188,15	215,34	100,00	44,30	55,70	124,51	124,51
Retak 4	54,35	5,367	6,023	200,43	229,25	100,00	43,65	56,35	136,23	136,23
Retak 5	54,35	5,510	6,111	215,06	245,85	100,00	42,92	57,08	150,25	150,25
Retak 6	54,35	5,869	6,333	249,48	285,05	100,00	41,27	58,73	183,11	183,11
Retak 7	54,35	5,960	6,479	276,47	315,86	100,00	40,53	59,47	210,26	210,26
Retak 8	54,35	6,113	6,836	334,17	381,86	100,00	39,35	60,65	268,24	268,24
Runtuh	54,35	6,158	6,948	351,85	402,07	100,00	39,03	60,97	285,98	285,98

Tabel L9. 4 Tegangan Lekat dan Panjang Slip Pelat HPFRC-2

Kondisi	f_c'	u_{bo}	u'_{bo}	f_{s2}	f_{s3}	S	S_x	S_y	$f_{s1(1)}$	$f_{s1(2)}$
Pelat	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	mm	mm	mm	Mpa	Mpa
Retak 2	55,49	5,401	5,152	233,19	226,55	63,00	33,05	29,95	184,27	184,27
Retak 3	55,49	5,831	5,757	243,16	236,23	63,00	33,48	29,52	189,66	189,66
Retak 4	55,49	5,751	5,438	267,65	260,05	63,00	33,10	29,90	215,48	215,48
Retak 5	55,49	6,370	5,934	327,99	318,65	63,00	33,15	29,85	270,11	270,11
Retak 6	55,49	6,156	5,999	352,67	342,62	63,00	34,11	28,89	295,13	295,13
Retak 7	55,49	6,230	6,051	377,06	366,30	63,00	34,24	28,76	318,60	318,60
Runtuh	55,49	6,373	6,179	428,56	418,14	63,00	34,04	28,96	369,10	369,10

Tabel L9. 5 Tegangan Lekat dan Panjang Slip Pelat HPFRC-3

Kondisi	f'_c	u_{bo}	u'_{bo}	f_{s2}	f_{s3}	S	S_x	S_y	$f_{s1(1)}$	$f_{s1(2)}$
Pelat	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	mm	mm	mm	Mpa	Mpa
Retak 2	60,68	6,100	7,074	254,99	287,46	85,00	36,65	48,35	193,72	193,72
Retak 3	60,68	6,561	6,169	298,89	264,03	85,00	51,18	33,82	206,85	206,85
Retak 4	60,68	7,059	5,920	287,91	242,01	85,00	51,67	33,33	187,94	187,94
Retak 5	60,68	7,478	7,762	349,51	357,33	85,00	41,42	43,58	264,62	264,62
Retak 6	60,68	6,497	5,989	272,12	221,90	85,00	55,45	29,55	173,39	173,39
Retak 7	60,68	6,088	6,986	284,54	354,24	85,00	25,97	59,03	241,21	241,21
Retak 8	60,68	6,115	7,548	262,46	315,31	85,00	32,84	52,16	207,42	207,42
Retak 9	60,68	6,665	6,160	271,22	247,73	85,00	47,51	37,49	184,44	184,44
Runtuh	60,68	9,023	9,263	472,40	472,40	85,00	43,06	41,94	365,92	365,92

Tabel L9. 6 Tegangan Lekat dan Panjang Slip Pelat HPFRC-4

Kondisi	f'_c	u_{bo}	u'_{bo}	f_{s2}	f_{s3}	S	S_x	S_y	$f_{s1(1)}$	$f_{s1(2)}$
Pelat	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	mm	mm	mm	Mpa	Mpa
Retak 2	67,67	7,25	9,42	225,21	295,76	187,00	90,22	96,78	46,00	46,00
Retak 3	67,67	6,82	7,68	230,34	302,42	187,00	80,94	106,06	79,11	79,11
Retak 4	67,67	7,93	10,37	255,83	335,77	187,00	90,06	96,94	60,16	60,16
Retak 5	67,67	8,32	10,93	273,51	358,94	187,00	89,97	97,03	68,35	68,35
Retak 6	67,67	7,19	8,35	286,29	375,71	187,00	79,48	107,52	129,67	129,67
Retak 7	67,67	6,37	6,82	378,48	402,32	47,00	17,70	29,30	347,57	347,57
Retak 8	67,67	5,96	7,58	396,47	421,47	47,00	19,59	27,41	364,50	364,50
Retak 9	67,67	6,05	7,80	415,45	441,68	47,00	19,56	27,44	383,03	383,03
Retak 10	67,67	6,06	7,82	417,57	443,94	47,00	19,56	27,44	385,11	385,11
Runtuh	67,67	6,08	7,88	422,20	448,86	47,00	19,55	27,45	389,62	389,62

Lampiran 10 Distribusi Tegangan Lekat pada saat Retak Pertama Pelat HPFRC

Tabel L10. 1 Distribusi Tegangan Lekat, Tegangan Tarik dan Perpanjangan Baja Pelat HPFRC-1

x mm	u_{b0} Mpa	S_0 mm	u_{bx} Mpa	S_0 $\times 10^{-3}$	f_{st1} Mpa	f_{stx} Mpa	e_{s0} $\times 10^{-3}$ mm
0,00	1,33	108,54	0,00	1,20	10,39	10,39	-5,94
5,00	1,33	108,54	0,23	1,20	10,39	10,63	-5,87
10,00	1,33	108,54	0,45	1,20	10,39	11,33	-5,68
15,00	1,33	108,54	0,63	1,20	10,39	12,45	-5,38
20,00	1,33	108,54	0,80	1,20	10,39	13,93	-4,97
25,00	1,33	108,54	0,94	1,20	10,39	15,72	-4,48
30,00	1,33	108,54	1,07	1,20	10,39	17,79	-3,92
35,00	1,33	108,54	1,16	1,20	10,39	20,09	-3,30
40,00	1,33	108,54	1,24	1,20	10,39	22,56	-2,62
45,00	1,33	108,54	1,29	1,20	10,39	25,17	-1,91
50,00	1,33	108,54	1,32	1,20	10,39	27,86	-1,18
60,00	1,33	108,54	1,32	1,20	10,39	33,32	0,31
70,00	1,33	108,54	1,22	1,20	10,39	38,57	1,74
75,00	1,33	108,54	1,14	1,20	10,39	40,99	2,40
80,00	1,33	108,54	1,03	1,20	10,39	43,23	3,01
85,00	1,33	108,54	0,90	1,20	10,39	45,22	3,55
90,00	1,33	108,54	0,75	1,20	10,39	46,93	4,02
95,00	1,33	108,54	0,58	1,20	10,39	48,31	4,39
100,00	1,33	108,54	0,39	1,20	10,39	49,30	4,66
108,54	1,33	108,54	0,00	1,20	10,39	50,00	4,85

Tabel L10. 2 Distribusi Tegangan Lekat, Tegangan Tarik dan Perpanjangan Baja Pelat HPFRC-2

x mm	u_{b0} Mpa	S_0 mm	u_{bx} Mpa	S_0 $\times 10^{-3}$	f_{st1} Mpa	f_{stx} Mpa	e_{s0} $\times 10^{-3}$ mm
0,00	1,24	118,73	0,00	1,11	9,55	9,55	-6,95
5,00	1,24	118,73	0,20	1,11	9,55	9,76	-6,88
10,00	1,24	118,73	0,38	1,11	9,55	10,37	-6,70
15,00	1,24	118,73	0,55	1,11	9,55	11,33	-6,42
20,00	1,24	118,73	0,70	1,11	9,55	12,61	-6,04
25,00	1,24	118,73	0,83	1,11	9,55	14,18	-5,57
30,00	1,24	118,73	0,94	1,11	9,55	16,00	-5,03
35,00	1,24	118,73	1,03	1,11	9,55	18,03	-4,42
40,00	1,24	118,73	1,11	1,11	9,55	20,23	-3,76
45,00	1,24	118,73	1,17	1,11	9,55	22,58	-3,06
50,00	1,24	118,73	1,21	1,11	9,55	25,03	-2,33
60,00	1,24	118,73	1,24	1,11	9,55	30,10	-0,82
70,00	1,24	118,73	1,20	1,11	9,55	35,15	0,68
75,00	1,24	118,73	1,16	1,11	9,55	37,58	1,41
80,00	1,24	118,73	1,09	1,11	9,55	39,90	2,10
85,00	1,24	118,73	1,01	1,11	9,55	42,06	2,74
90,00	1,24	118,73	0,91	1,11	9,55	44,04	3,33
95,00	1,24	118,73	0,80	1,11	9,55	45,80	3,86
100,00	1,24	118,73	0,66	1,11	9,55	47,30	4,30
105,00	1,24	118,73	0,51	1,11	9,55	48,50	4,66
118,73	1,24	118,73	0,00	1,11	9,55	50,00	5,11

Tabel L10. 3 Distribusi Tegangan Lekat, Tegangan Tarik dan Perpanjangan Baja Pelat HPFRC-3

x mm	u_{b0} Mpa	S_0 mm	u_{bx} Mpa	S_0 $\times 10^{-3}$	f_{st1} Mpa	f_{stx} Mpa	e_{s0} $\times 10^{-3}$ mm
0,00	1,69	77,72	0,00	1,44	14,05	14,05	-2,96
5,00	1,69	77,72	0,41	1,44	14,05	14,48	-2,87
10,00	1,69	77,72	0,76	1,44	14,05	15,69	-2,64
15,00	1,69	77,72	1,05	1,44	14,05	17,55	-2,27
20,00	1,69	77,72	1,29	1,44	14,05	19,97	-1,80
25,00	1,69	77,72	1,47	1,44	14,05	22,82	-1,25
30,00	1,69	77,72	1,60	1,44	14,05	25,99	-0,63
35,00	1,69	77,72	1,67	1,44	14,05	29,36	0,03
38,86	1,69	77,72	1,69	1,44	14,05	32,03	0,55
40,00	1,69	77,72	1,69	1,44	14,05	32,82	0,70
45,00	1,69	77,72	1,65	1,44	14,05	36,25	1,37
50,00	1,69	77,72	1,55	1,44	14,05	39,55	2,02
55,00	1,69	77,72	1,40	1,44	14,05	42,58	2,61
60,00	1,69	77,72	1,19	1,44	14,05	45,25	3,13
65,00	1,69	77,72	0,92	1,44	14,05	47,43	3,55
70,00	1,69	77,72	0,60	1,44	14,05	49,01	3,86
75,00	1,69	77,72	0,23	1,44	14,05	49,87	4,03
77,72	1,69	77,72	0,00	1,44	14,05	50,00	4,06

Tabel L10. 4 Distribusi Tegangan Lekat, Tegangan Tarik dan Perpanjangan Baja Pelat HPFRC-4

x mm	u_{b0} Mpa	S_0 mm	u_{bx} Mpa	S_0 $\times 10^{-3}$	f_{st1} Mpa	f_{stx} Mpa	e_{s0} $\times 10^{-3}$ mm
0,00	1,66	80,93	0,00	1,35	13,13	13,13	-3,42
5,00	1,66	80,93	0,39	1,35	13,13	13,53	-3,34
10,00	1,66	80,93	0,72	1,35	13,13	14,68	-3,10
15,00	1,66	80,93	1,00	1,35	13,13	16,46	-2,74
20,00	1,66	80,93	1,24	1,35	13,13	18,77	-2,27
25,00	1,66	80,93	1,42	1,35	13,13	21,51	-1,72
30,00	1,66	80,93	1,55	1,35	13,13	24,57	-1,09
35,00	1,66	80,93	1,63	1,35	13,13	27,85	-0,43
40,47	1,66	80,93	1,66	1,35	13,13	31,56	0,33
40,00	1,66	80,93	1,66	1,35	13,13	31,24	0,26
45,00	1,66	80,93	1,64	1,35	13,13	34,65	0,95
50,00	1,66	80,93	1,57	1,35	13,13	37,96	1,63
55,00	1,66	80,93	1,45	1,35	13,13	41,07	2,26
60,00	1,66	80,93	1,28	1,35	13,13	43,88	2,83
65,00	1,66	80,93	1,05	1,35	13,13	46,28	3,31
70,00	1,66	80,93	0,78	1,35	13,13	48,16	3,70
75,00	1,66	80,93	0,45	1,35	13,13	49,43	3,96
80,93	1,66	80,93	0,00	1,35	13,13	50,00	4,07

Lampiran 11 Distribusi Tegangan Lekat saat Pelat HPFRC Mengalami Kegagalan Lentur

Tabel L11. 1 Distribusi Tegangan Lekat HPFRC-1 saat Pelat Runtuh

x	u_{b0}	S_0	u_{bx}	S_0	f_{st1}	f_{stx}	e_{s0}
mm	MPa	mm	MPa	mm	MPa	MPa	mm
-39,03	6,16	39,03	0,00	0,0145	285,98	351,85	0,029
-35,00	6,16	39,03	-2,28	0,0145	285,98	349,89	0,029
-30,00	6,16	39,03	-4,38	0,0145	285,98	342,90	0,028
-25,00	6,16	39,03	-5,67	0,0145	285,98	332,43	0,027
-20,00	6,16	39,03	-6,15	0,0145	285,98	320,14	0,026
-15,00	6,16	39,03	-5,83	0,0145	285,98	307,69	0,025
-10,00	6,16	39,03	-4,69	0,0145	285,98	296,74	0,024
-5,00	6,16	39,03	-2,75	0,0145	285,98	288,95	0,023
0,00	6,16	39,03	0,00	0,0145	285,98	285,98	0,023
0,00	6,95	60,97	0,00	0,0253	285,98	285,98	-0,029
5,00	6,95	60,97	2,09	0,0253	285,98	288,19	-0,030
10,00	6,95	60,97	3,81	0,0253	285,98	294,33	-0,031
15,00	6,95	60,97	5,16	0,0253	285,98	303,60	-0,032
20,00	6,95	60,97	6,13	0,0253	285,98	315,26	-0,034
25,00	6,95	60,97	6,72	0,0253	285,98	328,53	-0,036
30,00	6,95	60,97	6,95	0,0253	285,98	342,64	-0,038
35,00	6,95	60,97	6,80	0,0253	285,98	356,83	-0,040
40,00	6,95	60,97	6,27	0,0253	285,98	370,32	-0,042
45,00	6,95	60,97	5,37	0,0253	285,98	382,35	-0,044
50,00	6,95	60,97	4,10	0,0253	285,98	392,15	-0,046
55,00	6,95	60,97	2,45	0,0253	285,98	398,95	-0,047
60,00	6,95	60,97	0,43	0,0253	285,98	401,99	-0,047
60,97	6,95	60,97	0,00	0,0253	285,98	402,07	-0,047

Tabel L11. 2 Distribusi Tegangan Lekat HPFRC-2 saat Pelat Runtuh

x	u_{b0}	S_0	u_{bx}	S_0	f_{st1}	f_{stx}	e_{s0}
mm	MPa	mm	MPa	mm	MPa	MPa	mm
-34,04	6,37	34,04	0,00	0,0160	369,10	428,56	0,032
-30,00	6,37	34,04	-2,67	0,0160	369,10	426,25	0,032
-25,00	6,37	34,04	-4,97	0,0160	369,10	418,21	0,032
-20,00	6,37	34,04	-6,18	0,0160	369,10	406,56	0,031
-15,00	6,37	34,04	-6,28	0,0160	369,10	393,56	0,030
-10,00	6,37	34,04	-5,29	0,0160	369,10	381,48	0,028
-5,00	6,37	34,04	-3,19	0,0160	369,10	372,58	0,028
0,00	6,37	34,04	0,00	0,0160	369,10	369,10	0,027
0,00	6,18	28,96	0,00	0,0134	369,10	369,10	-0,024
5,00	6,18	28,96	3,53	0,0134	369,10	372,98	-0,024
10,00	6,18	28,96	5,59	0,0134	369,10	382,61	-0,025
15,00	6,18	28,96	6,17	0,0134	369,10	394,95	-0,026
20,00	6,18	28,96	5,28	0,0134	369,10	406,97	-0,027
25,00	6,18	28,96	2,92	0,0134	369,10	415,65	-0,027
28,96	6,18	28,96	0,00	0,0134	369,10	418,14	-0,027

Tabel L11. 3 Distribusi Tegangan Lekat HPFRC-3 saat Pelat Runtuh

x	u_{b0}	S_0	u_{bx}	S_0	f_{st1}	f_{stx}	e_{s0}
mm	MPa	mm	MPa	mm	MPa	MPa	mm
-43,06	9,02	43,06	0,00	0,0214	365,92	472,40	0,042
-40,00	9,02	43,06	-2,38	0,0214	365,92	470,87	0,042
-35,00	9,02	43,06	-5,49	0,0214	365,92	462,61	0,041
-30,00	9,02	43,06	-7,63	0,0214	365,92	448,96	0,039
-25,00	9,02	43,06	-8,79	0,0214	365,92	431,93	0,037
-20,00	9,02	43,06	-8,98	0,0214	365,92	413,50	0,035
-15,00	9,02	43,06	-8,19	0,0214	365,92	395,69	0,033
-10,00	9,02	43,06	-6,44	0,0214	365,92	380,48	0,032
-5,00	9,02	43,06	-3,70	0,0214	365,92	369,90	0,031
0,00	9,02	43,06	0,00	0,0214	365,92	365,92	0,030
0,00	9,26	41,94	0,00	0,0212	365,92	365,92	-0,029
5,00	9,26	41,94	3,89	0,0212	365,92	370,10	-0,030
10,00	9,26	41,94	6,73	0,0212	365,92	381,19	-0,031
15,00	9,26	41,94	8,51	0,0212	365,92	397,04	-0,033
20,00	9,26	41,94	9,24	0,0212	365,92	415,47	-0,035
25,00	9,26	41,94	8,92	0,0212	365,92	434,31	-0,037
30,00	9,26	41,94	7,55	0,0212	365,92	451,42	-0,038
35,00	9,26	41,94	5,12	0,0212	365,92	464,61	-0,040
40,00	9,26	41,94	1,64	0,0212	365,92	471,74	-0,041
41,94	9,26	41,94	0,00	0,0212	365,92	472,40	-0,041

Tabel L11. 4 Distribusi Tegangan Lekat HPFRC-4 saat Pelat Runtuh

x	u_{b0}	S_0	u_{bx}	S_0	f_{st1}	f_{stx}	e_{s0}
mm	MPa	mm	MPa	mm	MPa	MPa	mm
-19,55	6,08	19,55	0,00	0,0093	389,62	422,20	0,019
-15,00	6,08	19,55	-4,34	0,0093	389,62	417,72	0,019
-10,00	6,08	19,55	-6,08	0,0093	389,62	406,47	0,019
-5,00	6,08	19,55	-4,63	0,0093	389,62	394,92	0,018
0,00	6,08	19,55	0,00	0,0093	389,62	389,62	0,018
0,00	7,88	27,45	0,00	0,0136	389,62	389,62	-0,024
5,00	7,88	27,45	4,69	0,0136	389,62	394,80	-0,024
10,00	7,88	27,45	7,30	0,0136	389,62	407,48	-0,025
15,00	7,88	27,45	7,81	0,0136	389,62	423,36	-0,026
20,00	7,88	27,45	6,23	0,0136	389,62	438,15	-0,027
25,00	7,88	27,45	2,56	0,0136	389,62	447,53	-0,028
27,45	7,88	27,45	0,00	0,0136	389,62	448,86	-0,028

Lampiran 12 Analisis LEFM Pelat HPFRC sebagai *Three Point Bending Element* (TPB) dan *Pure Bending Element* (PBE)

Tabel L12. 1 Hubungan Momen (M) dan Kedalaman Retak relatif (ξ) Pelat HPFRC

HPFRC-1		HPFRC-2		HPFRC-3		HPFRC-4	
Momen (M)	($\xi=a/h$)	Momen (M)	($\xi=a/h$)	Momen (M)	($\xi=a/h$)	Momen (M)	($\xi=a/h$)
kN-m		kN-m		kN-m		kN-m	
0,640	0,001	0,641	0,001	0,643	0,001	0,649	0,001
0,836	0,002	0,838	0,002	0,839	0,001	0,845	0,001
1,032	0,002	1,034	0,002	1,035	0,002	1,041	0,002
2,013	0,004	2,017	0,004	2,016	0,003	2,021	0,003
3,190	0,006	3,193	0,006	3,194	0,005	3,032	0,005
4,171	0,008	4,742	0,009	4,174	0,007	4,180	0,006
4,956	0,009	4,761	0,759	5,156	0,009	5,161	0,008
5,740	0,779	5,155	0,769	6,140	0,010	6,142	0,009
6,133	0,785	6,135	0,787	7,130	0,012	7,130	0,011
7,114	0,797	7,116	0,799	7,502	0,013	7,806	0,012
8,095	0,806	8,097	0,808	7,508	0,810	7,904	0,822
8,290	0,808	9,079	0,814	8,101	0,815	8,104	0,824
8,389	0,808	10,059	0,819	9,080	0,822	8,299	0,825
8,487	0,809	11,039	0,823	10,060	0,826	8,494	0,826
8,684	0,810	11,235	0,824	11,041	0,830	8,690	0,828
8,880	0,811	11,432	0,825	12,023	0,833	8,885	0,829
9,076	0,813	11,628	0,825	13,003	0,836	9,080	0,830
9,272	0,814	11,824	0,826	13,155	0,838	9,276	0,831
9,469	0,815	12,020	0,826	13,302	0,864	9,471	0,832
9,664	0,816	12,091	0,827	13,309	0,865	9,667	0,833
9,861	0,817	12,056	0,826	13,289	0,862	9,863	0,834
10,057	0,818	12,095	0,827	13,295	0,863	10,059	0,835
10,449	0,819	12,147	0,827	13,347	0,871	11,038	0,838
10,646	0,820	12,115	0,827	13,350	0,872	12,020	0,841
10,842	0,821	12,355	0,827	13,374	0,876	13,193	0,844
11,037	0,822	12,217	0,827	13,371	0,875	13,250	0,852
11,234	0,822	12,221	0,827	13,329	0,868	13,250	0,852
11,431	0,823	12,174	0,827	13,416	0,882	13,340	0,868
11,627	0,824	12,091	0,827	13,510	0,897	13,357	0,871
11,752	0,824	12,225	0,827	13,518	0,898	13,360	0,871

Tabel L12. 2 Hubungan Beban Sisa (P_{res}) dan Kedalaman Retak Relatif (ξ)

HPFRC-1		HPFRC-2		HPFRC-3		HPFRC-4	
$P_{res} = \frac{4(M_u - M)}{1,6}$ (kN)		$P_{res} = \frac{4(M_u - M)}{1,6}$ (kN)		$P_{res} = \frac{4(M_u - M)}{1,6}$ (kN)		$P_{res} = \frac{4(M_u - M)}{1,6}$ (kN)	
ξ		ξ		ξ		ξ	
29,381	0,000	30,562	0,000	33,794	0,000	33,400	0,000
19,934	0,007	28,959	0,001	29,734	0,003	29,815	0,002
16,991	0,009	18,707	0,009	19,925	0,009	19,511	0,008
15,031	0,779	18,659	0,759	15,040	0,013	13,885	0,012
14,050	0,785	9,337	0,811	15,025	0,810	13,641	0,822
13,559	0,788	8,849	0,812	9,626	0,825	12,652	0,825
13,363	0,789	8,360	0,813	8,643	0,826	11,676	0,828
13,068	0,790	7,866	0,814	7,908	0,828	11,188	0,829
12,578	0,793	7,377	0,815	6,681	0,830	10,700	0,830
12,381	0,794	6,887	0,816	5,701	0,831	10,211	0,831
12,087	0,795	6,485	0,817	4,718	0,832	9,721	0,832
11,596	0,797	6,397	0,817	3,736	0,833	9,232	0,833
11,204	0,799	5,907	0,818	2,753	0,834	8,742	0,834
11,106	0,799	5,415	0,819	1,777	0,835	8,252	0,835
10,615	0,801	4,925	0,820	0,907	0,838	7,763	0,835
10,124	0,803	4,709	0,821	0,907	0,838	7,275	0,836
9,634	0,805	4,434	0,821	0,950	0,834	6,785	0,837
9,143	0,806	3,943	0,822	0,846	0,842	6,295	0,838
8,655	0,808	3,452	0,823	0,986	0,832	5,805	0,838
8,408	0,808	2,964	0,823	0,986	0,832	5,315	0,839
8,163	0,809	2,957	0,823	0,806	0,845	4,824	0,840
7,672	0,810	2,475	0,824	0,762	0,848	4,334	0,840
7,181	0,811	1,983	0,825	0,671	0,855	3,841	0,841
6,691	0,813	1,491	0,825	0,538	0,864	3,350	0,841
6,200	0,814	1,001	0,826	0,521	0,865	2,859	0,842
5,709	0,815	0,512	0,826	0,571	0,862	2,368	0,842
5,220	0,816	0,335	0,827	0,557	0,863	1,922	0,843
4,728	0,817	0,423	0,826	0,472	0,868	1,857	0,843
4,239	0,818	0,325	0,827	0,427	0,871	1,360	0,843
3,748	0,819	0,196	0,827	0,410	0,872	0,416	0,844
3,258	0,819	0,196	0,827	0,427	0,871	0,419	0,844
2,767	0,820	0,276	0,827	0,418	0,872	0,617	0,844
2,276	0,821	-0,325	0,827	0,359	0,876	0,415	0,844
1,788	0,822	0,020	0,827	0,368	0,875	0,274	0,852
1,295	0,822	0,010	0,827	0,472	0,868	0,274	0,852
0,804	0,823	0,128	0,827	0,255	0,882	0,049	0,868
0,314	0,824	0,335	0,827	0,020	0,897	0,007	0,871
0,000	0,824	0,000	0,827	0,000	0,898	0,000	0,871

Tabel L12. 3 Hubungan Faktor Konsentrasi Tegangan dan Kedalaman Retak Relatif

HPFRC-1		HPFRC-2		HPFRC-3		HPFRC-4	
k_t	a/h	k_t	a/h	k_t	a/h	k_t	a/h
	mm		mm		mm		mm
2,047	0,779	2,568	0,759	1,801	0,810	1,690	0,822
1,980	0,782	2,058	0,784	1,755	0,812	1,649	0,824
1,916	0,785	1,993	0,787	1,711	0,814	1,610	0,825
1,857	0,788	1,818	0,795	1,669	0,815	1,573	0,826
1,834	0,789	1,767	0,797	1,629	0,817	1,537	0,828
1,801	0,790	1,697	0,800	1,592	0,818	1,504	0,829
1,749	0,793	1,587	0,805	1,556	0,819	1,471	0,830
1,728	0,794	1,510	0,808	1,521	0,820	1,440	0,831
1,699	0,795	1,474	0,809	1,489	0,822	1,411	0,832
1,652	0,797	1,440	0,811	1,457	0,823	1,382	0,833
1,616	0,799	1,408	0,812	1,427	0,824	1,355	0,834
1,608	0,799	1,377	0,813	1,398	0,825	1,328	0,835
1,566	0,801	1,347	0,814	1,344	0,826	1,303	0,835
1,526	0,803	1,318	0,815	1,293	0,828	1,278	0,836
1,488	0,805	1,291	0,816	1,269	0,829	1,255	0,837
1,452	0,806	1,269	0,817	1,246	0,830	1,244	0,837
1,418	0,808	1,265	0,817	1,224	0,830	1,232	0,838
1,401	0,808	1,240	0,818	1,203	0,831	1,210	0,838
1,385	0,809	1,215	0,819	1,182	0,832	1,189	0,839
1,353	0,810	1,192	0,820	1,162	0,832	1,169	0,840
1,323	0,811	1,182	0,821	1,124	0,833	1,149	0,840
1,295	0,813	1,170	0,821	1,089	0,834	1,130	0,841
1,267	0,814	1,148	0,822	1,055	0,835	1,111	0,841
1,241	0,815	1,127	0,823	1,040	0,836	1,094	0,842
1,216	0,816	1,107	0,823	1,028	0,838	1,076	0,842
1,192	0,817	1,107	0,823	1,029	0,834	1,061	0,843
1,169	0,818	1,088	0,824	1,026	0,842	1,059	0,843
1,146	0,819	1,069	0,825	1,030	0,832	1,042	0,843
1,125	0,819	1,051	0,825	1,024	0,845	1,013	0,844
1,104	0,820	1,034	0,826	1,023	0,848	1,013	0,844
1,084	0,821	1,017	0,826	1,017	0,862	1,019	0,844
1,065	0,822	1,011	0,827	1,014	0,868	1,013	0,844
1,046	0,822	1,014	0,826	1,012	0,872	1,008	0,852
1,028	0,823	1,011	0,827	1,008	0,882	1,008	0,852
1,011	0,824	1,006	0,827	1,001	0,897	1,001	0,868
1,000	0,824	1,000	0,827	1,000	0,898	1,000	0,871

Tabel L12. 4 Hubungan Teg. Lentur Pelat HPFRC (σ) dan Kedalaman Retak Relatif ($\xi=a/h$)

HPFRC-1		HPFRC-2		HPFRC-3		HPFRC-4	
σ	(ξ)	σ	(ξ)	σ	(ξ)	σ	(ξ)
Mpa	-	Mpa	-	Mpa	-	Mpa	-
0,666	0,001	0,668	0,001	0,670	0,001	0,676	0,001
1,075	0,002	1,077	0,002	1,078	0,002	1,085	0,002
2,097	0,004	2,101	0,004	2,100	0,003	2,106	0,003
3,119	0,006	3,123	0,006	3,123	0,005	3,159	0,005
4,141	0,008	4,143	0,007	4,144	0,007	4,151	0,006
5,162	0,009	4,940	0,009	5,167	0,008	5,173	0,008
5,979	0,779	4,960	0,759	6,190	0,010	6,195	0,009
6,184	0,782	5,164	0,764	7,014	0,012	7,015	0,010
7,001	0,793	6,186	0,784	8,023	0,812	8,131	0,012
8,024	0,803	7,004	0,795	9,049	0,819	8,233	0,822
8,228	0,805	8,026	0,805	10,070	0,825	9,052	0,828
8,432	0,806	9,047	0,812	11,093	0,829	10,070	0,833
8,636	0,808	10,032	0,817	12,115	0,832	11,090	0,837
8,739	0,808	11,091	0,822	13,138	0,835	11,702	0,839
8,841	0,809	11,296	0,823	13,670	0,832	11,906	0,840
9,045	0,810	11,499	0,823	13,670	0,832	12,111	0,840
9,250	0,811	11,502	0,823	13,745	0,845	12,316	0,841
9,454	0,813	11,703	0,824	13,763	0,848	12,521	0,841
9,659	0,814	11,908	0,825	13,801	0,855	12,725	0,842
9,863	0,815	12,113	0,825	13,857	0,864	12,930	0,842
10,067	0,816	12,317	0,826	13,864	0,865	13,116	0,843
10,272	0,817	12,521	0,826	13,884	0,868	13,143	0,843
10,476	0,818	12,595	0,827	13,903	0,871	13,350	0,843
10,680	0,819	12,558	0,826	13,910	0,872	13,743	0,844
10,885	0,819	12,599	0,827	13,903	0,871	13,742	0,844
11,089	0,820	12,619	0,827	13,907	0,872	13,660	0,844
11,294	0,821	12,870	0,827	13,931	0,876	13,744	0,844
11,497	0,822	12,726	0,827	13,928	0,875	13,802	0,852
11,703	0,822	12,730	0,827	13,884	0,868	13,802	0,852
11,907	0,823	12,681	0,827	13,975	0,882	13,896	0,868
12,111	0,824	12,595	0,827	14,073	0,897	13,914	0,871
12,242	0,824	12,734	0,827	14,081	0,898	13,917	0,871

Tabel L12. 5 Hubungan Zone Plastis (r_p^*) dan Kedalaman Retak Relatif (ξ) Pelat HPFRC

HPFRC-1		HPFRC-2		HPFRC-3		HPFRC-4	
r_p^*	(ξ)	r_p^*	(ξ)	r_p^*	(ξ)	r_p^*	(ξ)
mm		mm		mm		mm	
0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001
0,001	0,002	0,000	0,002	0,000	0,002	0,000	0,002
0,002	0,003	0,001	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003
0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004	0,005	0,004
0,004	0,004	0,009	0,005	0,008	0,005	0,009	0,005
0,008	0,005	0,013	0,006	0,014	0,006	0,018	0,006
0,015	0,006	0,023	0,007	0,023	0,007	0,029	0,007
0,025	0,007	0,036	0,008	0,035	0,008	0,042	0,008
0,034	0,008	0,053	0,009	0,051	0,009	0,065	0,009
0,067	0,009	4,606	0,759	0,071	0,010	0,087	0,010
7,430	0,779	10,215	0,797	0,095	0,011	0,115	0,011
10,374	0,793	20,290	0,817	0,114	0,012	0,164	0,012
15,298	0,806	24,936	0,822	0,159	0,013	11,512	0,822
16,074	0,808	25,888	0,823	9,999	0,810	20,466	0,836
16,473	0,808	26,852	0,823	10,546	0,812	23,731	0,839
16,876	0,809	26,867	0,823	20,573	0,829	24,584	0,840
17,694	0,810	27,835	0,824	30,931	0,836	25,453	0,840
18,531	0,811	28,841	0,825	32,842	0,855	26,342	0,841
19,387	0,813	29,865	0,825	33,459	0,864	27,242	0,841
20,262	0,814	30,901	0,826	33,541	0,865	28,157	0,842
21,156	0,815	31,955	0,826	33,307	0,862	29,088	0,842
22,066	0,816	32,341	0,827	33,372	0,863	29,944	0,843
23,001	0,817	32,148	0,826	33,769	0,868	30,071	0,843
23,949	0,818	32,362	0,827	33,976	0,871	31,043	0,843
24,919	0,819	32,645	0,827	34,056	0,872	32,931	0,844
25,909	0,819	32,645	0,827	33,976	0,871	32,925	0,844
26,917	0,820	32,470	0,827	34,016	0,872	32,526	0,844
27,945	0,821	33,076	0,827	34,288	0,876	32,934	0,844
28,986	0,822	33,032	0,827	34,250	0,875	33,515	0,852
30,055	0,822	33,054	0,827	33,769	0,868	33,515	0,852
31,138	0,823	32,794	0,827	34,767	0,882	34,606	0,868
32,241	0,824	32,341	0,827	35,838	0,897	34,811	0,871
32,956	0,824	33,076	0,827	35,929	0,898	34,843	0,871

Tabel L12. 6 Hubungan Faktor Intensitas Tegangan (K_I) dan Kedalaman Retak Relatif (ξ)

HPFRC-1		HPFRC-2		HPFRC-3		HPFRC-4	
K_I	$\xi = a/h$	K_I	$\xi = a/h$	K_I	$\xi = a/h$	K_I	$\xi = a/h$
N/mm ^{3/2}		N/mm ^{3/2}		N/mm ^{3/2}		N/mm ^{3/2}	
0,020	0,001	0,019	0,001	0,017	0,001	0,016	0,001
0,039	0,002	0,063	0,002	0,054	0,002	0,053	0,002
0,147	0,003	0,141	0,003	0,168	0,003	0,216	0,003
0,350	0,004	0,334	0,004	0,365	0,004	0,435	0,004
0,546	0,005	0,635	0,005	0,659	0,005	0,770	0,005
0,945	0,006	0,902	0,006	1,063	0,006	1,346	0,006
1,482	0,007	1,414	0,007	1,587	0,007	1,931	0,007
1,924	0,008	2,067	0,008	2,244	0,008	2,651	0,008
3,347	0,009	2,850	0,009	3,040	0,009	3,834	0,009
40,854	0,779	26,680	0,759	3,991	0,010	4,895	0,010
51,239	0,789	31,473	0,769	5,107	0,011	6,127	0,011
63,497	0,797	42,184	0,784	5,948	0,012	8,258	0,012
66,397	0,799	51,234	0,792	7,806	0,013	70,021	0,822
67,132	0,799	61,149	0,799	61,985	0,810	81,077	0,826
70,867	0,801	71,930	0,805	72,391	0,815	92,842	0,830
74,702	0,803	83,580	0,809	83,438	0,819	101,140	0,832
78,639	0,805	91,822	0,812	91,294	0,822	123,438	0,836
82,674	0,806	100,471	0,814	103,678	0,825	130,470	0,837
86,789	0,808	113,271	0,817	126,117	0,829	142,892	0,839
88,903	0,808	123,721	0,819	150,739	0,832	147,978	0,840
91,037	0,809	154,772	0,824	193,477	0,838	153,153	0,840
95,375	0,810	160,302	0,825	200,912	0,864	158,447	0,841
99,811	0,811	165,928	0,825	201,262	0,865	163,808	0,841
104,346	0,813	171,627	0,826	200,256	0,862	169,260	0,842
108,981	0,814	177,420	0,826	200,537	0,863	174,802	0,842
113,715	0,815	179,540	0,827	202,243	0,868	179,900	0,843
118,536	0,816	178,478	0,826	203,134	0,871	180,657	0,843
123,485	0,817	179,658	0,827	203,479	0,872	186,444	0,843
128,504	0,818	181,209	0,827	203,134	0,871	197,685	0,844
133,640	0,819	180,249	0,827	203,307	0,872	195,273	0,844
144,215	0,820	185,529	0,827	204,479	0,876	197,706	0,844
149,655	0,821	183,339	0,827	204,316	0,875	200,291	0,852
155,159	0,822	183,458	0,827	202,243	0,868	200,291	0,852
166,547	0,823	182,028	0,827	206,546	0,882	204,908	0,868
172,378	0,824	179,540	0,827	211,173	0,897	205,775	0,871
176,162	0,824	183,578	0,827	211,565	0,898	205,911	0,871

Tabel L12. 7 Hubungan Faktor Geometri $f(\xi)$ dan Kedalaman Retak Relatif (ξ)

HPFRC-1			HPFRC-2		
$\sigma \sqrt{\pi a}$	$f(\xi)$	(ξ)	$\sigma \sqrt{\pi a}$	$f(\xi)$	(ξ)
N/mm ^{3/2}	-	-	N/mm ^{3/2}	-	-
0,364	0,054	0,001	0,362	0,052	0,001
0,545	0,071	0,002	0,541	0,069	0,002
1,213	0,121	0,003	1,204	0,117	0,003
2,040	0,171	0,004	2,025	0,165	0,004
2,668	0,205	0,005	2,980	0,213	0,005
3,710	0,255	0,006	3,679	0,245	0,006
4,863	0,305	0,007	4,819	0,293	0,007
5,688	0,338	0,008	6,057	0,341	0,008
7,937	0,422	0,009	7,348	0,388	0,009
83,648	0,488	0,779	68,504	0,389	0,759
92,769	0,539	0,788	71,567	0,405	0,764
100,051	0,579	0,794	80,747	0,454	0,777
110,952	0,639	0,801	92,916	0,518	0,790
120,024	0,689	0,806	102,018	0,566	0,797
123,030	0,705	0,808	111,106	0,614	0,803
124,546	0,714	0,808	120,181	0,662	0,808
126,059	0,722	0,809	132,251	0,726	0,813
129,079	0,739	0,810	141,313	0,775	0,816
132,097	0,756	0,811	150,361	0,823	0,819
135,113	0,772	0,813	162,410	0,887	0,823
138,129	0,789	0,814	165,406	0,903	0,823
141,143	0,806	0,815	171,424	0,935	0,825
144,148	0,822	0,816	180,442	0,983	0,826
147,169	0,839	0,817	181,527	0,989	0,827
150,172	0,856	0,818	180,985	0,986	0,826
153,184	0,872	0,819	181,588	0,989	0,827
156,196	0,889	0,819	182,378	0,994	0,827
159,207	0,906	0,820	182,378	0,994	0,827
162,218	0,923	0,821	181,889	0,991	0,827
165,210	0,939	0,822	185,568	1,000	0,827
168,229	0,956	0,822	183,457	0,999	0,827
171,235	0,973	0,823	182,794	0,996	0,827
174,240	0,989	0,824	181,527	0,989	0,827
176,162	1,000	0,824	183,578	1,000	0,827

Tabel L12. 8 Hubungan Faktor Geometri $f(\xi)$ dan Kedalaman Retak Relatif (ξ)

HPFRC-3			HPFRC-4		
$\sigma \sqrt{\pi a}$	$f(\xi)$	(ξ)	$\sigma \sqrt{\pi a}$	$f(\xi)$	(ξ)
N/mm ^{3/2}	-	-	N/mm ^{3/2}	-	-
0,348	0,048	0,001	0,334	0,049	0,001
0,711	0,077	0,002	0,680	0,078	0,002
1,399	0,120	0,003	1,581	0,137	0,003
2,227	0,164	0,004	2,407	0,181	0,004
3,180	0,207	0,005	3,390	0,227	0,005
4,236	0,251	0,006	4,744	0,284	0,006
5,391	0,294	0,007	5,895	0,328	0,007
6,640	0,338	0,008	7,132	0,372	0,008
7,972	0,381	0,009	8,904	0,431	0,009
9,390	0,425	0,010	10,315	0,475	0,010
10,893	0,469	0,011	11,808	0,519	0,011
11,941	0,498	0,012	14,134	0,584	0,012
14,065	0,555	0,013	118,359	0,592	0,822
111,607	0,555	0,810	121,466	0,607	0,824
120,791	0,599	0,815	130,550	0,650	0,828
132,891	0,657	0,820	142,664	0,709	0,832
141,950	0,701	0,824	151,758	0,753	0,835
151,029	0,744	0,826	160,841	0,797	0,837
160,094	0,788	0,829	172,961	0,856	0,840
172,177	0,846	0,832	175,991	0,870	0,840
181,247	0,889	0,833	179,037	0,885	0,841
190,297	0,933	0,835	182,071	0,900	0,841
200,309	0,976	0,845	185,104	0,914	0,842
205,106	0,986	0,868	188,138	0,929	0,842
205,733	0,987	0,871	190,887	0,942	0,843
205,976	0,988	0,872	194,358	0,959	0,843
205,733	0,987	0,871	200,180	0,988	0,844
205,855	0,988	0,872	200,163	0,987	0,844
206,676	0,989	0,876	198,945	0,982	0,844
206,562	0,989	0,875	200,191	0,988	0,844
205,106	0,986	0,868	201,947	0,992	0,852
208,116	0,992	0,882	205,210	0,999	0,868
211,298	0,999	0,897	205,816	1,000	0,871
211,565	1,000	0,898	205,911	1,000	0,871

Tabel L12. 9 Hubungan Tingkat Pelepasan Energi (G_i), Ketahanan Fraktur (R) dan Kedalaman Retak Relatif (ξ)

HPFRC-1			HPFRC-2			HPFRC-3			HPFRC-4		
G_i	R	ξ	G_i	R	ξ	G_i	R	ξ	G_i	R	ξ
N/mm	N/mm	-	N/mm	N/mm	-	N/mm	N/mm	-	N/mm	N/mm	-
0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001
0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,002
0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,003
0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,004
0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,005
0,000	0,000	0,006	0,000	0,000	0,006	0,000	0,000	0,006	0,000	0,000	0,006
0,000	0,000	0,007	0,000	0,000	0,007	0,000	0,001	0,007	0,000	0,001	0,007
0,000	0,001	0,008	0,000	0,001	0,008	0,000	0,001	0,008	0,000	0,001	0,008
0,000	0,001	0,009	0,000	0,001	0,009	0,000	0,001	0,009	0,000	0,001	0,009
0,035	0,146	0,779	0,015	0,096	0,759	0,000	0,002	0,010	0,000	0,002	0,010
0,040	0,157	0,782	0,020	0,114	0,769	0,001	0,002	0,011	0,001	0,002	0,011
0,046	0,168	0,785	0,032	0,144	0,781	0,001	0,003	0,012	0,001	0,003	0,012
0,052	0,179	0,788	0,042	0,165	0,787	0,001	0,004	0,013	0,084	0,240	0,822
0,055	0,184	0,789	0,054	0,189	0,792	0,079	0,255	0,810	0,093	0,253	0,824
0,059	0,191	0,790	0,061	0,201	0,795	0,107	0,299	0,815	0,102	0,265	0,825
0,067	0,204	0,793	0,077	0,226	0,799	0,203	0,413	0,824	0,206	0,379	0,834
0,070	0,209	0,794	0,080	0,232	0,800	0,302	0,506	0,828	0,223	0,394	0,835
0,075	0,216	0,795	0,095	0,253	0,803	0,405	0,586	0,831	0,242	0,410	0,835
0,084	0,229	0,797	0,106	0,267	0,805	0,533	0,673	0,833	0,261	0,426	0,836
0,092	0,240	0,799	0,157	0,326	0,811	0,569	0,696	0,834	0,281	0,443	0,837
0,094	0,243	0,799	0,207	0,375	0,814	0,606	0,719	0,834	0,291	0,451	0,837
0,105	0,257	0,801	0,263	0,424	0,817	0,646	0,742	0,835	0,303	0,460	0,838
0,116	0,271	0,803	0,267	0,427	0,817	0,687	0,766	0,835	0,325	0,477	0,838
0,129	0,285	0,805	0,289	0,445	0,818	0,731	0,790	0,836	0,350	0,494	0,839
0,142	0,300	0,806	0,314	0,463	0,819	0,767	0,810	0,838	0,375	0,512	0,840
0,157	0,315	0,808	0,339	0,482	0,820	0,777	0,817	0,842	0,402	0,530	0,840
0,165	0,323	0,808	0,351	0,490	0,821	0,754	0,800	0,832	0,430	0,549	0,841
0,173	0,331	0,809	0,366	0,501	0,821	0,754	0,800	0,832	0,459	0,567	0,841
0,190	0,347	0,810	0,458	0,561	0,823	0,783	0,822	0,845	0,490	0,587	0,842
0,208	0,364	0,811	0,491	0,581	0,824	0,791	0,828	0,848	0,523	0,606	0,842
0,227	0,380	0,813	0,526	0,602	0,825	0,805	0,838	0,855	0,554	0,624	0,843
0,318	0,451	0,817	0,564	0,623	0,825	0,827	0,854	0,864	0,559	0,626	0,843
0,344	0,470	0,818	0,603	0,645	0,826	0,846	0,867	0,871	0,595	0,647	0,843
0,372	0,489	0,819	0,645	0,667	0,826	0,848	0,869	0,872	0,669	0,686	0,844
0,402	0,508	0,819	0,660	0,675	0,827	0,846	0,867	0,871	0,669	0,686	0,844
0,433	0,528	0,820	0,653	0,671	0,826	0,847	0,868	0,872	0,653	0,678	0,844
0,467	0,548	0,821	0,661	0,676	0,827	0,857	0,875	0,876	0,669	0,686	0,844
0,502	0,569	0,822	0,673	0,681	0,827	0,855	0,874	0,875	0,687	0,698	0,852
0,539	0,590	0,822	0,666	0,678	0,827	0,838	0,862	0,868	0,687	0,698	0,852
0,578	0,611	0,823	0,705	0,705	0,827	0,874	0,888	0,882	0,719	0,721	0,868
0,619	0,633	0,824	0,689	0,690	0,827	0,914	0,915	0,897	0,725	0,725	0,871
0,647	0,647	0,824	0,679	0,685	0,827	0,917	0,917	0,898	0,726	0,726	0,871

Lampiran 13 Analisis LEFM Pelat HPFRC Akibat Reaksi Tulangan dan Momen Lentur

Tabel L13. 1 Analisis Faktor Geometri Akibat Reaksi Tulangan pada Pelat HPFRC-1

F_{st}	$(h/2-ds)$	$F(h/2-ds)$	$\sigma_{st} = F/bh$	rp^*	KIF	$\sigma \sqrt{\pi a}$	$f(\xi)$
kN	mm	kN-m	N/mm ²	mm	N/mm ^{3/2}	N/mm ^{3/2}	-
0,668	20	0,013	0,186	0,000	0,000	0,101	0,003
0,874	20	0,017	0,243	0,000	0,001	0,152	0,004
1,080	20	0,022	0,300	0,000	0,001	0,209	0,005
2,119	20	0,042	0,589	0,000	0,006	0,573	0,010
3,171	20	0,063	0,881	0,000	0,015	1,048	0,015
4,021	20	0,080	1,117	0,000	0,028	1,495	0,019
5,095	20	0,102	1,415	0,000	0,051	2,132	0,024
5,312	20	0,106	1,475	0,000	0,056	2,269	0,025
102,148	20	2,043	28,374	7,065	189,052	396,954	0,476
113,360	20	2,267	31,489	8,804	234,199	443,109	0,529
120,779	20	2,416	33,550	10,058	266,705	473,616	0,563
131,111	20	2,622	36,420	11,941	315,469	516,065	0,611
131,847	20	2,637	36,624	12,082	319,098	519,087	0,615
135,524	20	2,710	37,646	12,795	337,536	534,183	0,632
139,196	20	2,784	38,666	13,527	356,462	549,255	0,649
142,866	20	2,857	39,685	14,279	375,889	564,311	0,666
146,529	20	2,931	40,703	15,049	395,795	579,339	0,683
150,172	20	3,003	41,715	15,835	416,094	594,277	0,700
152,009	20	3,040	42,225	16,239	426,522	601,809	0,709
153,842	20	3,077	42,734	16,647	437,051	609,319	0,717
157,499	20	3,150	43,750	17,476	458,444	624,305	0,734
161,152	20	3,223	44,764	18,324	480,324	639,273	0,751
164,802	20	3,296	45,778	19,191	502,695	654,226	0,768
168,451	20	3,369	46,792	20,078	525,558	669,167	0,785
172,098	20	3,442	47,805	20,984	548,914	684,096	0,802
175,733	20	3,515	48,815	21,906	572,699	698,973	0,819
179,388	20	3,588	49,830	22,854	597,120	713,929	0,836
183,021	20	3,660	50,839	23,815	621,891	728,788	0,853
186,665	20	3,733	51,851	24,799	647,243	743,691	0,870
190,309	20	3,806	52,864	25,803	673,098	758,589	0,887
193,953	20	3,879	53,876	26,826	699,455	773,484	0,904
197,597	20	3,952	54,888	27,869	726,317	788,376	0,921
201,219	20	4,024	55,894	28,925	753,510	803,171	0,938
204,873	20	4,097	56,909	30,010	781,454	818,098	0,955
208,512	20	4,170	57,920	31,110	809,781	832,958	0,972
212,151	20	4,243	58,931	32,229	838,608	847,814	0,989
214,480	20	4,290	59,578	32,956	857,320	857,320	1,000

Tabel L13. 2 Analisis Faktor Geometri Akibat Reaksi Tulangan pada Pelat HPFRC-2

F_{st}	$(h/2-ds)$	$F(h/2-ds)$	$\sigma_{st} = F/bh$	rp^*	KIF	$\sigma \sqrt{\pi a}$	$f(\xi)$
kN	mm	kN-m	N/mm ²	mm	N/mm ^{3/2}	N/mm ^{3/2}	
0,656	20	0,013	0,182	0,000	0,000	0,099	0,003
0,858	20	0,017	0,238	0,000	0,001	0,148	0,004
1,061	20	0,021	0,295	0,000	0,001	0,203	0,005
2,081	20	0,042	0,578	0,000	0,005	0,557	0,009
3,111	20	0,062	0,864	0,000	0,014	1,018	0,014
4,151	20	0,083	1,153	0,000	0,029	1,568	0,019
4,973	20	0,099	1,381	0,000	0,046	2,055	0,022
83,062	20	1,661	23,073	4,212	118,693	318,693	0,372
105,863	20	2,117	29,406	7,065	195,929	412,769	0,475
120,719	20	2,414	33,533	9,314	256,530	473,930	0,541
131,756	20	2,635	36,599	11,183	306,792	519,309	0,591
142,776	20	2,856	39,660	13,218	361,428	564,573	0,640
150,089	20	3,002	41,691	14,661	400,139	594,588	0,673
161,022	20	3,220	44,728	16,955	461,665	639,432	0,722
171,967	20	3,439	47,768	19,418	527,629	684,285	0,771
182,891	20	3,658	50,803	22,039	597,834	729,022	0,820
186,523	20	3,730	51,812	22,947	622,137	743,887	0,836
188,124	20	3,762	52,257	23,353	633,006	750,439	0,844
190,162	20	3,803	52,823	23,875	646,974	758,778	0,853
193,801	20	3,876	53,834	24,822	672,293	773,667	0,869
197,441	20	3,949	54,845	25,786	698,097	788,553	0,885
201,059	20	4,021	55,850	26,763	724,228	803,348	0,902
201,116	20	4,022	55,866	26,778	724,644	803,581	0,902
204,687	20	4,094	56,858	27,760	750,908	818,179	0,918
208,331	20	4,167	57,870	28,780	778,186	833,071	0,934
211,975	20	4,239	58,882	29,817	805,947	847,960	0,950
215,604	20	4,312	59,890	30,869	834,078	862,785	0,967
219,232	20	4,385	60,898	31,939	862,678	877,602	0,983
220,545	20	4,411	61,262	32,330	873,145	882,963	0,989
219,888	20	4,398	61,080	32,134	867,904	880,282	0,986
220,618	20	4,412	61,283	32,352	873,728	883,260	0,989
221,573	20	4,431	61,548	32,638	881,390	887,162	0,993
221,573	20	4,431	61,548	32,638	881,390	887,162	0,993
220,982	20	4,420	61,384	32,461	876,648	884,750	0,991
225,432	20	4,509	62,620	33,808	912,660	902,914	1,011
222,879	20	4,458	61,911	33,032	891,908	892,492	0,999
222,952	20	4,459	61,931	33,054	892,498	892,790	1,000
222,076	20	4,442	61,688	32,790	885,436	889,216	0,996
220,545	20	4,411	61,262	32,330	873,145	882,963	0,989
223,024	20	4,460	61,951	33,076	893,087	893,087	1,000

Tabel L13. 3 Analisis Faktor Geometri Akibat Reaksi Tulangan pada Pelat HPFRC-3

F_{st}	$(h/2-ds)$	$F(h/2-ds)$	$\sigma_{st} = F/bh$	rp^*	KIF	$\sigma \sqrt{\pi a}$	$f(\xi)$
kN	mm	kN-m	N/mm ²	mm	N/mm ^{3/2}	N/mm ^{3/2}	-
0,604	20	0,012	0,168	0,000	0,000	0,087	0,003
1,160	20	0,023	0,322	0,000	0,001	0,232	0,005
2,095	20	0,042	0,582	0,000	0,005	0,562	0,009
3,040	20	0,061	0,845	0,000	0,012	0,983	0,013
4,188	20	0,084	1,163	0,000	0,028	1,587	0,018
5,154	20	0,103	1,432	0,000	0,047	2,166	0,022
6,138	20	0,123	1,705	0,000	0,072	2,814	0,026
7,137	20	0,143	1,983	0,000	0,105	3,525	0,030
7,314	20	0,146	2,032	0,000	0,112	3,657	0,031
134,931	20	2,699	37,481	10,323	301,865	534,903	0,564
153,198	20	3,064	42,555	13,432	390,935	610,138	0,641
171,324	20	3,426	47,590	16,915	490,616	684,698	0,717
182,196	20	3,644	50,610	19,194	555,796	729,377	0,762
200,279	20	4,006	55,633	23,301	673,149	803,621	0,838
222,016	20	4,440	61,671	28,757	828,974	892,758	0,929
232,835	20	4,657	64,676	31,683	912,538	937,084	0,974
236,447	20	4,729	65,680	32,691	941,317	951,872	0,989
239,098	20	4,782	66,416	33,502	963,611	963,611	1,000
239,098	20	4,782	66,416	33,502	963,611	963,611	1,000
239,098	20	4,782	66,416	33,373	961,752	961,752	1,000
239,098	20	4,782	66,416	33,683	966,202	966,202	1,000
239,098	20	4,782	66,416	33,262	960,153	960,153	1,000
239,098	20	4,782	66,416	33,262	960,153	960,153	1,000
239,098	20	4,782	66,416	33,800	967,885	967,885	1,000
239,098	20	4,782	66,416	33,927	969,701	969,701	1,000
239,098	20	4,782	66,416	34,186	973,391	973,391	1,000
239,098	20	4,782	66,416	34,552	978,584	978,584	1,000
239,098	20	4,782	66,416	34,599	979,258	979,258	1,000
239,098	20	4,782	66,416	34,462	977,316	977,316	1,000
239,098	20	4,782	66,416	34,501	977,861	977,861	1,000
239,098	20	4,782	66,416	34,732	981,128	981,128	1,000
239,098	20	4,782	66,416	34,851	982,809	982,809	1,000
239,098	20	4,782	66,416	34,897	983,456	983,456	1,000
239,098	20	4,782	66,416	34,851	982,809	982,809	1,000
239,098	20	4,782	66,416	34,874	983,134	983,134	1,000
239,098	20	4,782	66,416	35,028	985,313	985,313	1,000
239,098	20	4,782	66,416	35,007	985,012	985,012	1,000
239,098	20	4,782	66,416	34,732	981,128	981,128	1,000
239,098	20	4,782	66,416	35,297	989,089	989,089	1,000
239,098	20	4,782	66,416	35,881	997,227	997,227	1,000
239,098	20	4,782	66,416	35,929	997,899	997,899	1,000

Tabel L13. 4 Analisis Faktor Geometri Akibat Reaksi Tulangan pada Pelat HPFRC-4

F_{st}	$(h/2-ds)$	$F(h/2-ds)$	$\sigma_{st} = F/bh$	rp^*	K_{IF}	$\sigma \sqrt{\pi a}$	$f(\xi)$
kN	mm	kN-m	N/mm ²	mm	N/mm ^{3/2}	N/mm ^{3/2}	
0,548	20	0,011	0,152	0,000	0,000	0,075	0,002
1,049	20	0,021	0,291	0,000	0,001	0,199	0,004
2,058	20	0,041	0,572	0,000	0,005	0,547	0,009
3,079	20	0,062	0,855	0,000	0,013	1,000	0,013
4,112	20	0,082	1,142	0,000	0,027	1,543	0,017
5,157	20	0,103	1,432	0,000	0,047	2,166	0,022
6,041	20	0,121	1,678	0,000	0,069	2,744	0,025
6,832	20	0,137	1,898	0,000	0,094	3,299	0,029
141,684	20	2,834	39,357	11,551	335,283	565,805	0,593
152,576	20	3,052	42,382	13,462	389,784	610,823	0,638
156,174	20	3,123	43,382	14,125	408,686	625,689	0,653
159,763	20	3,195	44,378	14,802	427,983	640,512	0,668
163,358	20	3,267	45,377	15,497	447,761	655,362	0,683
166,954	20	3,339	46,376	16,207	467,984	670,208	0,698
170,550	20	3,411	47,375	16,932	488,651	685,051	0,713
174,146	20	3,483	48,374	17,674	509,763	699,891	0,728
177,742	20	3,555	49,373	18,431	531,318	714,728	0,743
181,338	20	3,627	50,372	19,204	553,318	729,561	0,758
184,934	20	3,699	51,371	19,993	575,761	744,392	0,773
188,515	20	3,770	52,365	20,794	598,553	759,159	0,788
192,109	20	3,842	53,364	21,614	621,870	773,977	0,803
193,834	20	3,877	53,843	22,013	633,220	781,088	0,811
195,703	20	3,914	54,362	22,449	645,631	788,791	0,819
199,297	20	3,986	55,360	23,300	669,834	803,603	0,834
202,892	20	4,058	56,359	24,167	694,480	818,411	0,849
206,486	20	4,130	57,357	25,049	719,569	833,217	0,864
210,080	20	4,202	58,356	25,947	745,100	848,020	0,879
213,695	20	4,274	59,360	26,866	771,225	862,906	0,894
217,295	20	4,346	60,360	27,797	797,687	877,727	0,909
220,895	20	4,418	61,360	28,743	824,598	892,549	0,924
224,497	20	4,490	62,360	29,706	851,961	907,372	0,939
227,761	20	4,555	63,267	30,592	877,138	920,801	0,953
228,241	20	4,565	63,400	30,723	880,876	922,778	0,955
231,883	20	4,638	64,412	31,729	909,458	937,758	0,970
238,800	20	4,776	66,333	33,683	965,002	966,208	0,999
238,779	20	4,776	66,327	33,677	964,832	966,122	0,999
237,332	20	4,747	65,926	33,264	953,082	960,174	0,993
238,812	20	4,776	66,337	33,687	965,105	966,260	0,999
239,098	20	4,782	66,416	34,071	971,754	971,754	1,000
239,098	20	4,782	66,416	34,071	971,754	971,754	1,000
239,098	20	4,782	66,416	34,709	980,804	980,804	1,000
239,098	20	4,782	66,416	34,825	982,449	982,449	1,000
239,098	20	4,782	66,416	34,843	982,706	982,706	1,000

Tabel L13. 5 Analisis Faktor Geometri Akibat Momen Lentur pada Pelat HPFRC-1

M	$M^*=M-F(h/2-ds)$	$\sigma_{M^*} = 6M^*/bh^2$	rp^*	K_{IM}	$\sigma \sqrt{\pi a}$	$f(\xi)$
kN-m	kN-m	N/mm ²	mm	N/mm ^{3/2}	N/mm ^{3/2}	-
0,640	0,626	0,652	0,000	0,030	0,357	0,084
1,032	1,011	1,053	0,001	0,099	0,732	0,135
2,013	1,971	2,053	0,011	0,527	1,998	0,264
2,994	2,931	3,053	0,035	1,426	3,631	0,393
3,190	3,123	3,253	0,042	1,672	3,996	0,418
4,956	4,850	5,052	0,159	5,047	7,767	0,650
5,740	3,697	3,851	7,645	26,690	53,876	0,495
6,133	3,940	4,104	8,752	30,433	57,647	0,528
7,114	4,551	4,740	11,858	40,917	67,102	0,610
7,271	4,649	4,842	12,400	42,742	68,616	0,623
7,310	4,673	4,868	12,537	43,205	68,995	0,626
7,506	4,796	4,996	13,235	45,556	70,889	0,643
7,703	4,919	5,124	13,951	47,971	72,783	0,659
7,899	5,042	5,252	14,688	50,451	74,678	0,676
8,095	5,165	5,380	15,442	52,992	76,573	0,692
8,290	5,287	5,507	16,212	55,585	78,459	0,708
8,389	5,349	5,572	16,608	56,916	79,411	0,717
8,487	5,411	5,636	17,008	58,261	80,360	0,725
8,684	5,534	5,764	17,820	60,993	82,256	0,742
8,880	5,657	5,893	18,650	63,788	84,151	0,758
9,076	5,780	6,021	19,500	66,645	86,046	0,775
9,272	5,903	6,149	20,368	69,565	87,941	0,791
9,469	6,027	6,278	21,255	72,548	89,836	0,808
9,664	6,150	6,406	22,158	75,584	91,725	0,824
9,861	6,273	6,535	23,085	78,702	93,624	0,841
10,057	6,396	6,663	24,026	81,863	95,513	0,857
10,253	6,520	6,791	24,989	85,098	97,407	0,874
10,449	6,643	6,920	25,970	88,396	99,301	0,890
10,646	6,767	7,049	26,970	91,757	101,196	0,907
10,842	6,890	7,177	27,990	95,181	103,090	0,923
11,037	7,013	7,305	29,021	98,646	104,973	0,940
11,234	7,137	7,434	30,081	102,206	106,872	0,956
11,431	7,260	7,563	31,155	105,813	108,763	0,973
11,627	7,384	7,691	32,247	109,482	110,654	0,989
11,752	7,463	7,774	32,956	111,863	111,863	1,000

Tabel L13. 6 Analisis Faktor Geometri Akibat Momen Lentur pada Pelat HPFRC-2

M	$M^*=M-F(h/2-ds)$	$\sigma_M^* = 6M^*/bh^2$	rp^*	K_{IM}	$\sigma \sqrt{\pi a}$	$f(\xi)$
kN-m	kN-m	N/mm ²	mm	N/mm ^{3/2}	N/mm ^{3/2}	
0,641	0,628	0,654	0,000	0,029	0,355	0,081
1,034	1,013	1,055	0,001	0,095	0,727	0,130
2,017	1,975	2,058	0,010	0,505	1,984	0,254
3,193	3,127	3,257	0,038	1,596	3,962	0,403
3,388	3,318	3,456	0,046	1,851	4,332	0,427
3,586	3,511	3,658	0,054	2,134	4,719	0,452
3,781	3,703	3,857	0,064	2,438	5,112	0,477
3,977	3,894	4,056	0,074	2,767	5,516	0,502
4,742	4,643	4,836	0,126	4,302	7,194	0,598
4,761	3,100	3,229	4,840	17,807	44,602	0,399
5,155	3,339	3,478	5,688	20,793	48,353	0,430
6,135	3,943	4,108	8,119	29,337	57,767	0,508
7,116	4,554	4,744	10,997	39,433	67,230	0,587
8,097	5,168	5,384	14,318	51,064	76,713	0,666
9,079	5,785	6,026	18,080	64,225	86,205	0,745
10,059	6,401	6,668	22,275	78,885	95,684	0,824
11,039	7,018	7,310	26,903	95,046	105,155	0,904
11,042	7,020	7,313	26,918	95,099	105,184	0,904
11,235	7,141	7,439	27,879	98,454	107,045	0,920
11,432	7,265	7,568	28,877	101,938	108,944	0,936
11,628	7,389	7,697	29,892	105,482	110,842	0,952
11,824	7,512	7,825	30,920	109,071	112,733	0,968
12,020	7,636	7,954	31,965	112,719	114,622	0,983
12,091	7,680	8,000	32,347	114,054	115,305	0,989
12,056	7,658	7,977	32,156	113,385	114,963	0,986
12,095	7,683	8,003	32,369	114,128	115,343	0,989
12,147	7,715	8,037	32,648	115,105	115,841	0,994
12,147	7,715	8,037	32,648	115,105	115,841	0,994
12,115	7,695	8,016	32,475	114,500	115,533	0,991
12,355	7,846	8,173	33,790	119,091	117,849	1,011
12,217	7,760	8,083	33,033	116,446	116,520	0,999
12,221	7,762	8,085	33,054	116,521	116,558	1,000
12,174	7,732	8,054	32,796	115,621	116,103	0,996
12,091	7,680	8,000	32,347	114,054	115,305	0,989
12,225	7,764	8,088	33,076	116,596	116,596	1,000

Tabel L13. 7 Analisis Faktor Geometri Akibat Momen Lentur pada Pelat HPFRC-3

M	$M^* = M - F(h/2 - d_s)$	$\sigma_M^* = 6M^*/bh^2$	rp^*	K_{IM}	$\sigma \sqrt{\pi a}$	$f(\xi)$
kN-m	kN-m	N/mm ²	mm	N/mm ^{3/2}	N/mm ^{3/2}	
0,643	0,631	0,657	0,000	0,025	0,341	0,072
1,035	1,015	1,058	0,001	0,081	0,697	0,116
2,016	1,978	2,060	0,007	0,430	1,900	0,226
3,194	3,133	3,264	0,028	1,362	3,797	0,359
4,174	4,094	4,265	0,062	2,664	5,684	0,469
5,156	5,056	5,267	0,117	4,525	7,819	0,579
6,140	6,022	6,272	0,199	7,019	10,183	0,689
7,502	7,356	7,662	0,366	11,612	13,791	0,842
7,508	4,809	5,009	9,823	39,354	71,489	0,550
7,702	4,931	5,137	10,350	41,424	73,384	0,564
7,903	5,057	5,268	10,907	43,608	75,331	0,579
8,101	5,182	5,398	11,474	45,833	77,264	0,593
8,296	5,305	5,526	12,045	48,070	79,162	0,607
8,492	5,428	5,654	12,630	50,364	81,061	0,621
8,687	5,551	5,782	13,229	52,713	82,962	0,635
8,885	5,675	5,912	13,849	55,145	84,886	0,650
9,080	5,798	6,040	14,477	57,606	86,789	0,664
10,060	6,417	6,684	17,834	70,752	96,326	0,735
11,041	7,035	7,328	21,538	85,251	105,858	0,805
12,023	7,656	7,975	25,598	101,134	115,404	0,876
13,003	8,274	8,619	29,988	118,305	124,908	0,947
13,155	8,373	8,722	30,778	121,287	126,542	0,958
13,213	8,431	8,782	31,601	123,750	128,224	0,965
13,249	8,467	8,820	32,118	125,297	129,268	0,969
13,302	8,520	8,875	32,869	127,547	130,771	0,975
13,309	8,527	8,883	32,968	127,845	130,969	0,976
13,289	8,507	8,862	32,683	126,989	130,400	0,974
13,295	8,513	8,868	32,763	127,228	130,559	0,974
13,329	8,547	8,903	33,247	128,680	131,521	0,978
13,347	8,565	8,922	33,501	129,441	132,023	0,980
13,354	8,572	8,929	33,600	129,737	132,217	0,981
13,347	8,565	8,922	33,501	129,441	132,023	0,980
13,350	8,568	8,925	33,551	129,590	132,120	0,981
13,374	8,592	8,950	33,885	130,593	132,777	0,984
13,371	8,589	8,947	33,839	130,453	132,686	0,983
13,329	8,547	8,903	33,247	128,680	131,521	0,978
13,416	8,634	8,994	34,478	132,371	133,934	0,988
13,510	8,728	9,091	35,815	136,381	136,506	0,999
13,518	8,736	9,100	35,929	136,723	136,723	1,000

Tabel L13. 8 Analisis Faktor Geometri Akibat Momen Lentur pada Pelat HPFRC-4

M	$M^*=M-F(h/2-ds)$	$\sigma_m^* = 6M^*/bh^2$	rp^*	K_{IM}	$\sigma \sqrt{\pi a}$	$f(\xi)$
kN-m	kN-m	N/mm ²	mm	N/mm ^{3/2}	N/mm ^{3/2}	
0,649	0,638	0,665	0,000	0,024	0,329	0,074
0,845	0,831	0,865	0,000	0,047	0,488	0,097
1,041	1,024	1,066	0,001	0,080	0,668	0,119
2,021	1,987	2,070	0,007	0,419	1,811	0,232
3,032	2,980	3,105	0,022	1,158	3,333	0,347
4,180	4,108	4,279	0,058	2,588	5,405	0,479
5,161	5,072	5,283	0,110	4,392	7,429	0,591
6,142	6,036	6,287	0,186	6,799	9,663	0,704
7,130	7,006	7,298	0,292	9,888	12,107	0,817
7,806	7,669	7,989	0,384	12,416	13,887	0,894
7,904	5,070	5,281	11,491	44,875	75,924	0,591
8,104	5,196	5,413	12,092	47,180	77,885	0,606
9,080	5,813	6,055	15,245	59,261	87,450	0,678
10,059	6,432	6,700	18,772	72,766	97,041	0,750
10,255	6,556	6,829	19,522	75,637	98,961	0,764
10,450	6,680	6,958	20,284	78,551	100,873	0,779
10,646	6,804	7,087	21,063	81,533	102,792	0,793
10,740	6,863	7,149	21,442	82,983	103,714	0,800
10,842	6,928	7,217	21,857	84,570	104,712	0,808
11,038	7,052	7,346	22,666	87,663	106,631	0,822
11,234	7,176	7,475	23,489	90,812	108,551	0,837
11,430	7,300	7,605	24,327	94,017	110,470	0,851
11,626	7,425	7,734	25,180	97,278	112,389	0,866
11,823	7,549	7,864	26,052	100,614	114,319	0,880
12,020	7,674	7,994	26,935	103,991	116,241	0,895
12,216	7,798	8,123	27,833	107,425	118,163	0,909
12,413	7,923	8,253	28,746	110,916	120,085	0,924
12,591	8,036	8,371	29,586	114,127	121,827	0,937
12,617	8,052	8,388	29,711	114,603	122,083	0,939
12,816	8,178	8,519	30,664	118,247	124,026	0,953
13,193	8,417	8,768	32,515	125,324	127,715	0,981
13,192	8,417	8,767	32,509	125,302	127,704	0,981
13,113	8,367	8,715	32,118	123,806	126,932	0,975
13,194	8,418	8,768	32,518	125,337	127,722	0,981
13,250	8,468	8,821	33,206	127,417	129,065	0,987
13,250	8,468	8,821	33,206	127,417	129,065	0,987
13,340	8,558	8,915	34,549	131,348	131,650	0,998
13,357	8,575	8,933	34,803	132,092	132,133	1,000
13,360	8,578	8,935	34,843	132,208	132,208	1,000

Lampiran 14 Lendutan Pelat HPFRC

Tabel L14. 1 Pembacaan Data Lendutan Pelat HPFRC-1

Beban	LVDT 1	LVDT 2	LVDT 3	Beban	LVDT 1	LVDT 2	LVDT 3
	$\frac{1}{4} L$	$\frac{1}{2} L$	$\frac{1}{2} L$		$\frac{1}{4} L$	$\frac{1}{2} L$	$\frac{1}{2} L$
kN	mm	mm	mm	kN	mm	mm	mm
1,60	0,00	0,04	0,02	16,31	3,58	5,14	6,84
2,09	0,04	0,06	0,04	16,80	3,92	5,64	7,42
2,58	0,14	0,18	0,14	17,00	4,02	5,80	7,57
3,07	0,22	0,24	0,22	17,30	4,18	6,04	7,80
3,56	0,26	0,34	0,32	17,79	4,46	6,46	8,42
4,05	0,34	0,36	0,38	18,18	4,72	6,84	8,82
4,54	0,40	0,46	0,48	18,28	4,78	6,94	8,92
5,03	0,42	0,54	0,54	18,77	5,22	7,60	9,54
5,52	0,50	0,59	0,62	19,26	5,48	7,98	9,94
6,01	0,56	0,68	0,70	19,75	5,88	8,46	10,44
6,50	0,60	0,74	0,82	20,24	6,18	8,86	10,82
6,99	0,56	0,82	0,90	20,73	6,60	9,30	11,36
7,49	0,74	0,90	0,98	20,97	6,78	9,78	11,59
7,98	0,76	0,96	1,08	21,22	6,96	10,26	11,82
8,47	0,84	1,04	1,16	21,71	7,48	10,70	12,70
8,96	0,88	1,04	1,24	22,20	7,78	11,01	13,06
9,45	0,94	1,16	1,34	22,69	8,22	11,58	13,56
9,94	1,00	1,22	1,44	23,18	8,52	11,98	14,00
10,43	1,02	1,24	1,54	23,67	8,92	12,82	14,32
10,92	1,10	1,36	1,68	24,16	9,26	13,10	14,98
11,41	1,12	1,42	1,72	24,65	9,70	13,65	15,54
11,90	1,18	1,48	1,82	25,14	10,00	14,05	15,94
12,39	1,24	1,60	1,94	25,63	10,38	14,58	16,50
12,61	1,26	1,62	1,98	26,12	10,70	15,00	16,92
12,88	1,26	1,62	1,98	26,61	11,16	15,54	17,62
13,37	1,50	2,02	2,40	27,11	11,46	15,95	17,92
13,86	1,62	2,22	2,66	27,60	11,82	16,48	18,42
14,35	1,94	2,60	2,46	28,09	12,18	17,00	18,96
14,84	2,12	2,92	2,74	28,58	12,64	17,56	19,52
15,33	2,24	3,14	3,00	29,07	13,06	18,20	20,12
15,82	2,84	4,02	3,96	29,38	13,44	18,76	20,72
16,02	3,06	4,52	6,20				

Tabel L14. 2 Pembacaan Data Lendutan Pelat HPFRC-2

Beban	LVDT 1	LVDT 2	LVDT 3	Beban	LVDT 1	LVDT 2	LVDT 3
	$\frac{1}{4} L$	$\frac{1}{2} L$	$\frac{1}{2} L$		$\frac{1}{4} L$	$\frac{1}{2} L$	$\frac{1}{2} L$
kN	mm	mm	mm	kN	mm	mm	mm
1,60	0,00	0,00	0,00	17,30	2,82	3,76	4,30
2,09	0,04	0,06	0,08	17,79	3,32	2,26	4,84
2,58	0,10	0,08	0,14	18,01	3,43	2,49	5,07
3,08	0,18	0,12	0,22	18,28	3,56	2,78	5,36
3,57	0,24	0,20	0,30	18,77	3,74	3,04	5,64
4,06	0,28	0,28	0,36	19,26	3,90	3,28	5,86
4,55	0,34	0,30	0,42	19,75	4,66	4,24	6,88
5,04	0,42	0,34	0,48	20,24	4,64	4,50	7,12
5,53	0,46	0,44	0,56	20,73	5,16	4,90	7,56
6,02	0,56	0,44	0,62	21,22	5,34	5,24	7,86
6,51	0,62	0,52	0,70	21,71	5,58	5,60	8,24
7,00	0,66	0,58	0,76	22,20	5,76	5,82	8,46
7,49	0,70	0,62	0,80	22,70	5,96	6,22	8,86
7,98	0,76	0,68	0,90	23,19	6,20	6,46	9,14
8,47	0,82	0,76	0,94	23,68	6,48	6,62	9,52
8,96	0,86	0,80	1,02	24,08	6,64	6,87	9,78
9,45	0,90	0,98	1,08	24,17	6,68	6,92	9,84
9,94	0,98	0,94	1,14	24,66	7,18	7,78	10,74
10,43	1,02	1,00	1,18	25,15	7,36	8,02	11,00
10,92	1,08	1,06	1,24	25,64	7,62	8,40	11,40
11,41	1,12	1,14	1,30	25,85	7,72	8,54	11,55
11,86	1,16	1,22	1,38	26,13	7,84	8,72	11,74
11,90	1,62	1,94	2,12	26,62	8,64	9,56	12,58
12,39	1,72	2,10	2,30	27,11	8,92	9,94	12,96
12,89	1,84	2,26	2,44	27,60	9,24	10,36	13,40
13,38	1,92	2,42	2,58	27,61	9,25	10,38	13,42
13,87	2,04	2,56	2,74	28,09	9,74	11,16	14,24
14,36	2,14	2,70	2,90	28,58	10,14	11,82	14,92
14,85	2,26	2,92	3,06	29,07	10,62	12,10	15,60
15,34	2,36	3,08	3,20	29,56	11,40	16,54	16,82
15,83	2,42	3,22	3,68	30,05	12,28	18,02	18,26
16,32	2,64	3,36	3,82	30,56	12,64	18,66	18,88
16,81	2,66	3,50	4,04				

Tabel L14. 3 Pembacaan Data Lendutan Pelat HPFRC-3

Beban	LVDT 1	LVDT 2	LVDT 3	Beban	LVDT 1	LVDT 2	LVDT 3
	$\frac{1}{4} L$	$\frac{1}{2} L$	$\frac{1}{2} L$		$\frac{1}{4} L$	$\frac{1}{2} L$	$\frac{1}{2} L$
kN	mm	mm	mm	kN	mm	mm	mm
1,61	-0,06	0,00	-0,02	23,19	4,24	6,24	6,18
2,10	0,02	-0,22	0,00	23,68	4,48	6,70	6,68
2,59	0,10	-0,16	0,05	24,17	4,60	6,92	6,90
3,08	0,16	-0,06	0,12	24,66	4,78	7,28	7,28
3,57	0,20	0,00	0,18	25,15	4,92	7,46	7,44
4,06	0,26	0,10	0,24	25,64	5,10	7,68	7,70
4,55	0,36	0,14	0,30	25,89	5,17	7,82	7,79
5,04	0,40	0,24	0,38	26,13	5,24	7,96	7,88
5,53	0,46	0,30	0,44	26,62	5,46	8,26	8,12
6,02	0,50	0,36	0,52	27,11	5,58	8,48	8,36
6,51	0,58	0,42	0,58	27,60	6,18	9,65	9,54
7,00	0,64	0,48	0,64	28,09	6,62	10,26	10,12
7,49	0,66	0,54	0,70	28,58	6,84	10,46	10,36
7,98	0,72	0,60	0,78	29,08	7,42	11,24	11,14
8,47	0,80	0,68	0,86	29,57	7,54	11,46	11,34
8,96	0,82	0,74	0,94	30,06	7,72	11,72	11,62
9,46	0,90	0,80	1,00	30,55	8,18	12,30	12,20
9,95	0,96	0,84	1,08	31,04	8,59	12,68	12,58
10,44	1,00	0,92	1,14	31,53	8,78	13,05	12,98
10,93	1,06	1,00	1,20	32,02	8,94	13,34	13,24
11,42	1,10	1,04	1,28	32,51	9,18	13,72	13,60
11,91	1,18	1,08	1,36	32,89	9,42	14,08	13,98
12,40	1,20	1,18	1,42	32,89	9,42	14,10	14,00
12,89	1,26	1,20	1,46	32,84	9,44	14,18	14,10
13,38	1,32	1,30	1,54	32,96	9,54	14,28	14,20
13,87	1,38	1,34	1,58	32,80	9,58	14,34	14,30
14,36	1,42	1,40	1,64	32,69	9,66	14,56	14,44
14,85	1,46	1,46	1,70	32,80	9,70	14,58	14,50
15,34	1,52	1,52	1,76	33,00	9,73	14,68	14,59
15,83	1,56	1,56	1,80	33,03	9,74	14,69	14,60
16,32	1,62	1,62	1,86	33,13	9,82	14,78	14,70
16,81	1,68	1,68	1,92	33,28	9,90	14,92	14,80
17,30	1,70	1,72	2,00	33,30	9,94	15,00	14,90
17,79	1,76	1,78	2,06	33,23	10,00	15,08	15,00
18,28	1,82	1,84	2,12	33,29	10,04	15,20	15,10
18,75	1,86	1,94	2,20	33,32	10,10	15,29	15,20
18,75	2,38	2,92	3,10	33,37	10,18	15,40	15,32
18,77	2,38	2,92	3,12	33,39	10,22	15,50	15,40
19,27	2,46	3,02	3,26	33,37	10,26	15,62	15,50
19,76	2,54	3,20	3,40	33,38	10,36	15,70	15,62
20,25	2,62	3,32	3,50	33,45	10,50	16,02	15,94
20,74	2,72	3,74	3,62	33,44	10,59	16,10	16,04
21,23	2,60	3,86	3,74	33,32	10,60	16,20	16,10
21,72	3,38	4,72	4,64	33,54	10,66	16,34	16,24
22,21	3,48	4,86	4,78	33,77	10,80	16,54	16,48
22,70	4,08	5,95	5,90	33,79	10,84	16,64	16,56

Tabel L14. 4 Pembacaan Data Lendutan Pelat HPFRC-4

Beban P	LVDT 1	LVDT 2	LVDT 3	Beban P	LVDT 1	LVDT 2	LVDT 3
	$\frac{1}{4} L$	$\frac{1}{2} L$	$\frac{1}{2} L$		$\frac{1}{4} L$	$\frac{1}{2} L$	$\frac{1}{2} L$
kN	mm	mm	mm	kN	mm	mm	mm
1,62	0,04	-0,08	0,00	20,26	3,52	4,32	3,78
2,11	0,34	0,20	-0,10	20,75	3,72	4,52	3,96
2,60	0,70	0,34	-0,08	21,24	4,12	5,02	4,32
3,09	0,80	0,68	-0,32	21,73	4,46	5,62	4,84
3,58	0,82	0,70	-0,10	22,22	4,76	5,84	4,70
4,07	0,89	0,80	-0,12	22,71	5,34	6,56	5,78
4,57	1,04	0,92	-0,08	23,20	5,48	6,72	5,94
5,06	1,12	0,90	-0,10	23,69	5,84	7,60	6,70
5,55	1,28	1,06	-0,06	24,19	6,00	7,85	7,02
6,04	1,48	1,16	0,08	24,68	6,22	8,18	7,32
6,53	1,55	1,24	0,14	25,17	6,48	8,42	7,58
7,02	1,52	1,20	0,08	25,66	6,78	8,74	7,92
7,51	1,58	1,40	0,24	26,15	6,99	8,96	8,08
8,00	1,44	1,34	0,20	26,64	6,82	9,28	8,36
8,49	1,52	1,65	0,30	26,87	7,61	9,97	9,16
8,98	1,56	1,72	0,36	27,13	8,46	10,72	10,02
9,47	1,59	1,78	0,34	27,62	8,58	10,83	10,14
9,96	1,59	1,84	0,40	28,11	8,88	11,30	10,62
10,45	1,70	1,90	0,46	28,60	9,12	11,65	11,02
10,94	1,78	1,96	0,54	29,09	9,29	11,92	11,24
11,43	1,79	2,06	0,64	29,58	9,55	12,36	11,62
11,92	1,89	2,10	0,70	30,07	10,53	13,16	12,40
12,41	2,03	2,20	0,82	30,56	10,58	13,65	12,80
12,90	2,09	2,20	0,84	31,05	10,74	14,16	13,42
13,39	2,04	2,20	0,90	31,48	10,72	14,25	13,53
13,88	2,09	2,36	1,04	31,54	10,72	14,26	13,54
14,38	2,14	2,38	1,04	32,03	10,85	14,80	13,85
14,87	2,22	2,54	1,20	32,52	11,65	15,06	14,78
15,36	2,38	2,52	1,22	32,98	12,14	18,36	15,44
15,85	2,24	2,52	1,24	32,98	12,14	18,36	15,44
16,34	2,32	2,64	1,34	32,78	12,19	18,41	15,52
16,83	2,34	2,64	1,36	32,98	12,42	18,08	15,64
17,32	2,42	2,72	1,46	33,10	12,46	18,76	15,70
17,81	2,64	2,78	1,58	32,70	12,52	18,84	15,80
18,30	2,48	2,38	1,58	33,14	13,05	19,09	16,58
18,79	2,68	2,92	1,68	33,44	13,40	19,26	17,10
19,28	2,68	2,92	1,74	33,50	13,68	19,52	17,40
19,52	2,56	2,94	1,76	33,50	13,68	19,52	17,39
19,77	3,52	4,16	3,64				

Tabel L14. 5 Beban dan Lendutan Hasil Analisis Metode Elemen Hingga (FEM)

HPFRC-1		HPFRC-2		HPFRC-3		HPFRC-4	
Beban	Lendutan	Beban	Lendutan	Beban	Lendutan	Beban	Lendutan
kN	mm	kN	mm	kN	mm	kN	mm
0,20	0,006	0,20	0,008	0,2	0,01		
0,69	0,022	0,69	0,027	0,7	0,03	0,24	0,006
1,18	0,038	1,18	0,047	1,2	0,04	0,73	0,017
2,16	0,069	2,16	0,086	2,2	0,08	1,22	0,029
3,14	0,100	3,14	0,125	4,1	0,15	2,20	0,053
4,12	0,131	4,12	0,164	6,1	0,22	4,17	0,099
5,10	0,163	5,10	0,203	8,1	0,29	6,13	0,146
6,08	0,194	6,08	0,242	10,0	0,36	8,09	0,193
7,06	0,225	7,06	0,282	12,0	0,43	10,05	0,239
8,04	0,257	8,04	0,321	13,9	0,50	12,01	0,286
9,02	0,288	9,03	0,360	15,9	0,57	13,97	0,333
10,00	0,319	10,01	0,399	17,9	0,64	15,93	0,380
10,98	0,351	10,99	0,438	18,4	0,66	17,89	0,426
11,96	0,382	11,48	0,457	18,8	0,57	18,88	0,450
12,45	0,397	11,86	0,482	21,2	4,02	19,37	0,461
12,61	0,431	17,30	4,096	22,2	5,15	19,52	0,617
14,35	1,187	18,01	4,789	24,2	6,01	22,22	3,182
16,02	2,986	19,75	7,996	25,9	6,42	22,71	3,684
17,00	3,549	24,08	9,366	27,1	6,58	25,17	3,522
18,18	3,728	25,85	10,181	29,1	8,09	26,87	3,833
20,97	4,926	27,61	11,028	33,0	9,43	28,11	4,760
23,18	4,927	30,56	13,351	33,8	11,03	30,07	5,035
29,38	8,219					31,48	6,907
						32,98	7,462
						33,14	7,357
						33,50	9,753

Lampiran 15 Tegangan Regangan Hasil Uji Pelat HFPRC

Tabel L15. 1 Hubungan Tegangan Regangan HPRC-1

Baja Tarik		Beton Tekan		Beton Tarik	
Tegangan MPa	Regangan $\times 10^{-4}$	Tegangan MPa	Regangan $\times 10^{-4}$	Tegangan MPa	Regangan $\times 10^{-4}$
1,28	-0,03	0,45	0,04	0,61	-2,00
1,68	0,02	0,58	-0,02	0,80	0,00
2,08	0,01	0,72	-0,06	0,99	-1,00
4,07	0,06	1,40	-0,28	1,94	-1,00
6,50	0,20	2,22	-0,55	3,08	0,00
8,55	0,30	2,91	-0,82	4,04	0,00
10,21	0,38	3,46	-1,05	4,81	0,00
196,25	3,61	11,85	-1,58	6,93	4,00
203,46	4,43	12,20	-1,70	6,93	5,00
210,64	5,33	12,55	-1,91	6,93	7,00
220,65	7,23	13,04	-3,61	6,93	12,00
232,05	8,79	13,60	-4,33	6,93	14,00
234,89	9,01	13,74	-4,43	6,93	14,00
239,15	9,34	13,95	-4,58	6,93	14,00
251,90	10,68	14,58	-5,06	6,93	16,80
260,38	11,35	15,00	-5,59	6,93	17,00
274,48	12,31	15,69	-6,19	6,93	23,00
281,52	12,76	16,04	-6,39	6,93	23,00
288,52	13,57	16,39	-6,67	6,93	24,00
292,05	13,88	16,56	-6,78	6,93	24,00
295,57	14,20	16,74	-6,89	6,93	24,00
302,60	15,01	17,08	-7,12	6,93	28,00
316,63	16,37	17,78	-7,65	6,93	31,00
323,64	17,02	18,13	-7,86	6,93	31,00
330,64	17,96	18,47	-8,09	6,93	32,00
337,63	18,57	18,82	-8,26	6,93	32,50
344,65	19,46	19,16	-8,46	6,93	34,00
351,63	20,07	19,51	-8,65	6,93	34,50
358,63	20,81	19,85	-8,87	6,93	39,00
372,63	22,23	20,54	-9,26	6,93	40,00
379,64	22,91	20,88	-9,46	6,93	41,00
386,59	24,24	21,22	-9,65	6,93	41,00
393,62	24,85	21,57	-9,93	6,93	41,00
400,61	25,98	21,91	-10,28	6,93	43,00
412,07	27,10	22,47	-10,86	6,93	46,00

Tabel L15. 2 Hubungan Tegangan Regangan HPRC-2

Baja Tarik		Beton Tekan		Beton Tarik	
Tegangan	Regangan	Tegangan	Regangan	Tegangan	Regangan
MPa	$\times 10^{-4}$	MPa	$\times 10^{-4}$	MPa	$\times 10^{-4}$
1,26	-0,07	0,45	0,00	0,62	-2,00
1,65	-0,05	0,58	-0,03	0,81	-2,00
2,04	0,03	0,72	-0,07	0,99	-1,00
4,00	0,12	1,41	-0,27	1,94	-1,00
6,37	0,21	2,23	-0,58	3,09	-1,00
9,55	0,34	3,31	-1,00	4,60	0,00
188,97	9,39	11,61	-2,61	7,00	2,00
239,02	15,06	14,08	-3,69	7,00	5,00
246,10	15,73	14,43	-3,81	7,00	9,00
249,22	15,98	14,59	-3,89	7,00	9,44
253,14	16,30	14,78	-3,99	7,00	10,00
260,22	16,97	15,14	-4,17	7,00	9,00
267,27	17,53	15,49	-4,31	7,00	11,00
274,31	18,77	15,84	-4,47	7,00	13,00
281,34	19,26	16,19	-4,58	7,00	13,00
288,36	20,00	16,54	-4,77	7,00	13,00
302,38	21,42	17,24	-5,26	7,00	16,00
309,37	21,97	17,59	-5,43	7,00	15,00
323,41	23,34	18,30	-5,89	7,00	15,00
330,39	24,09	18,64	-6,12	7,00	16,00
336,12	24,67	18,93	-6,28	7,00	16,00
337,38	24,80	18,99	-6,31	7,00	16,00
351,38	26,30	19,69	-6,77	7,00	17,00
361,44	27,54	20,19	-7,15	7,00	17,44
372,34	28,90	20,73	-7,53	7,00	19,00
379,34	29,91	21,08	-7,79	7,00	22,00
386,40	31,03	21,43	-8,09	7,00	22,00
393,26	31,09	21,77	-8,43	7,00	22,00
400,26	36,01	22,11	-8,89	7,00	27,00
407,26	35,19	22,46	-9,38	7,00	26,00
414,23	34,18	22,80	-10,20	7,00	32,00
421,20	31,11	23,14	-10,99	7,00	40,00
423,72	31,50	23,27	-11,30	7,00	42,00
422,46	31,53	23,21	-11,31	7,00	43,00
428,49	33,09	23,50	-11,78	7,00	52,92

Tabel L15. 3 Hubungan Tegangan Regangan HPRC-3

Baja Tarik		Beton Tekan		Beton Tarik	
Tegangan	Regangan	Tegangan	Regangan	Tegangan	Regangan
MPa	$\times 10^{-4}$	MPa	$\times 10^{-4}$	MPa	$\times 10^{-4}$
1,16	-0,03	0,4477	0,02	0,62	0,00
1,52	0,01	0,5844	-0,01	0,81	0,00
1,87	0,07	0,7208	-0,06	1,00	0,00
3,66	0,08	1,4052	-0,30	1,95	0,00
5,84	0,22	2,2282	-0,59	3,09	0,00
7,67	0,26	2,9139	-0,85	4,05	0,00
9,53	0,40	3,6018	-1,09	5,01	0,00
11,41	0,44	4,2929	-1,38	5,98	0,00
14,05	0,65	5,2500	-1,84	7,33	0,00
259,24	11,47	15,7435	-2,04	7,32	5,00
294,33	15,26	17,5773	-2,43	7,32	7,00
301,28	16,45	17,9407	-2,68	7,32	9,00
308,31	17,49	18,3083	-2,78	7,32	9,00
315,26	17,64	18,6717	-6,60	7,32	11,00
336,11	19,67	19,7609	-7,89	7,32	16,00
343,06	20,19	20,1235	-8,12	7,32	16,00
350,05	20,73	20,4880	-8,33	7,32	16,00
350,05	21,41	20,4880	-8,57	7,32	17,00
360,47	21,69	21,0311	-8,68	7,32	17,50
363,95	21,97	21,2119	-8,79	7,32	18,00
370,90	22,59	21,5734	-9,04	7,32	19,00
377,86	23,27	21,9350	-9,28	7,32	19,00
384,79	23,95	22,2943	-9,51	7,32	20,00
405,67	25,99	23,3747	-10,22	7,32	22,00
412,63	26,51	23,7339	-10,40	7,32	23,00
419,59	27,57	24,0925	-10,60	7,32	22,00
426,55	27,81	24,4506	-10,93	7,32	23,00
433,51	28,51	24,8081	-11,17	7,32	24,00
440,44	29,19	25,1634	-11,45	7,32	25,00
447,34	29,77	25,5164	-11,65	7,32	25,00
454,27	30,74	25,8709	-11,96	7,32	26,00
459,37	32,26	26,3196	-12,15	7,32	29,00
459,37	36,26	27,2881	-12,29	7,32	30,87
459,37	36,36	27,7291	-12,30	7,32	31,00
459,37	26,87	38,2205	-12,76	7,32	43,00

Tabel L15. 4 Hubungan Tegangan Regangan HPRC-4

Baja Tarik		Beton Tekan		Beton Tarik	
Tegangan	Regangan	Tegangan	Regangan	Tegangan	Regangan
MPa	$\times 10^{-4}$	MPa	$\times 10^{-4}$	MPa	$\times 10^{-4}$
1,05	0,17	0,45	-0,02	0,63	1,00
1,69	0,23	0,73	-0,10	1,01	1,00
3,30	0,25	1,41	-0,30	1,96	2,00
4,98	0,49	2,12	-0,50	2,94	2,00
6,90	0,55	2,92	-0,78	4,07	2,00
8,56	0,57	3,61	-0,97	5,03	1,00
10,24	1,61	4,30	-1,19	6,00	1,00
11,95	1,79	4,99	-1,46	6,97	1,00
13,13	1,61	5,47	-1,70	7,65	2,00
272,21	11,03	17,30	-3,31	7,73	7,00
279,31	11,81	17,69	-3,52	7,73	8,00
306,95	17,34	19,22	-6,08	7,73	11,00
313,85	18,11	19,60	-6,37	7,73	19,50
348,40	20,50	21,50	-7,21	7,73	18,00
372,41	23,30	22,82	-7,99	7,73	24,96
376,00	23,75	23,02	-8,14	7,73	26,00
382,90	24,56	23,40	-8,25	7,73	26,00
389,81	24,87	23,78	-8,52	7,73	26,00
396,71	25,40	24,16	-8,78	7,73	22,00
403,62	26,15	24,54	-9,08	7,73	22,00
410,56	27,08	24,92	-9,30	7,73	23,00
417,48	27,50	25,29	-9,61	7,73	24,00
424,40	28,35	25,67	-9,88	7,73	24,00
431,32	28,03	26,05	-10,24	7,73	26,00
437,59	28,99	26,39	-10,28	7,73	27,76
438,51	29,13	26,44	-10,29	7,73	28,00
445,51	28,83	26,82	-10,63	7,73	31,50
458,80	28,78	27,54	-11,25	7,73	37,50
458,76	28,78	27,54	-11,25	7,73	37,50
455,98	28,73	27,38	-11,23	7,73	37,50
458,82	29,20	27,54	-11,30	7,73	36,00
459,37	28,68	28,64	-11,42	7,73	37,00
459,37	30,11	28,64	-11,37	7,73	39,40
459,37	30,43	31,30	-11,36	7,73	41,00
459,37	30,42	31,95	-11,82	7,73	44,00

Lampiran 16 Beban, Kedalaman Retak Relatif dan Lebar Retak

Tabel L16. 1 Beban, Kedalaman Retak dan Lebar Retak Pelat HPFRC-1

Beban	Kedalaman Retak relatif	PBE	TPB	F&M	ACI	Eurocode	AS3600
P	ξ	W_{maks}	W_{maks}	W_{maks}	W_{maks}	W_{maks}	W_{maks}
kN	-	mm	mm	mm	mm	mm	mm
0,195	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,586	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,170	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000
2,090	0,002	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000
4,053	0,003	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000
5,033	0,004	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000
7,487	0,006	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,000
8,468	0,006	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,000
9,449	0,007	0,000	0,000	0,000	0,007	0,000	0,000
10,431	0,008	0,000	0,000	0,000	0,008	0,000	0,000
15,933	0,010	0,001	0,001	0,001	0,010	0,000	0,000
16,349	0,011	0,001	0,001	0,001	0,011	0,000	0,000
17,784	0,014	0,001	0,001	0,001	0,014	0,000	0,000
16,460	0,047	0,003	0,003	0,003	0,014	0,000	0,000
15,640	0,074	0,004	0,004	0,004	0,015	0,000	0,000
14,215	0,123	0,007	0,007	0,006	0,016	0,000	0,000
13,594	0,146	0,008	0,008	0,007	0,017	0,000	0,000
11,195	0,243	0,011	0,011	0,009	0,020	0,000	0,000
7,178	0,508	0,012	0,012	0,009	0,038	0,000	0,000
8,291	0,686	0,019	0,019	0,013	0,074	0,000	0,000
9,704	0,724	0,025	0,025	0,017	0,091	0,000	0,000
11,272	0,749	0,031	0,031	0,022	0,109	0,000	0,000
12,814	0,766	0,038	0,038	0,026	0,126	0,012	0,000
15,320	0,785	0,048	0,048	0,033	0,153	0,036	0,000
17,002	0,794	0,055	0,055	0,038	0,171	0,052	0,000
18,046	0,798	0,060	0,060	0,041	0,182	0,062	0,000
20,235	0,806	0,069	0,069	0,048	0,204	0,083	0,000
21,220	0,809	0,073	0,073	0,051	0,215	0,092	0,000
22,198	0,811	0,078	0,078	0,054	0,225	0,101	0,000
23,181	0,814	0,082	0,082	0,056	0,235	0,111	0,014
24,161	0,816	0,086	0,086	0,059	0,245	0,120	0,030
25,027	0,817	0,090	0,090	0,062	0,254	0,128	0,045
26,124	0,819	0,094	0,094	0,065	0,265	0,139	0,063
28,577	0,823	0,105	0,105	0,072	0,291	0,162	0,104
29,381	0,824	0,108	0,108	0,074	0,299	0,169	0,118

Tabel L16. 2 Beban, Kedalaman Retak dan Lebar Retak Pelat HPFRC-2

Beban	Kedalaman Retak relatif	PBE	TPB	F&M	ACI	Eurocode	AS3600
		P kN	ξ	w_{maks} mm	w_{maks} mm	w_{maks} mm	w_{maks} mm
0,199	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,399	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,598	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,194	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000
2,094	0,002	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000
3,076	0,002	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000
4,056	0,003	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000
5,037	0,004	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000
8,472	0,006	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,000
9,454	0,007	0,000	0,000	0,000	0,007	0,000	0,000
10,782	0,008	0,000	0,000	0,000	0,008	0,000	0,000
11,412	0,008	0,000	0,000	0,000	0,008	0,000	0,000
15,718	0,009	0,001	0,001	0,000	0,009	0,000	0,000
16,144	0,010	0,001	0,001	0,001	0,010	0,000	0,000
17,407	0,013	0,001	0,001	0,001	0,013	0,000	0,000
16,621	0,047	0,003	0,003	0,003	0,014	0,000	0,000
15,652	0,078	0,005	0,005	0,004	0,015	0,000	0,000
14,219	0,128	0,007	0,007	0,006	0,016	0,000	0,000
13,595	0,151	0,008	0,008	0,007	0,017	0,000	0,000
11,186	0,248	0,011	0,011	0,009	0,020	0,000	0,000
7,167	0,512	0,012	0,012	0,008	0,038	0,000	0,000
7,228	0,627	0,014	0,014	0,010	0,056	0,000	0,000
8,290	0,689	0,019	0,019	0,013	0,074	0,000	0,000
9,707	0,726	0,025	0,025	0,017	0,091	0,000	0,000
11,278	0,752	0,031	0,031	0,021	0,109	0,000	0,000
15,325	0,787	0,048	0,048	0,033	0,153	0,035	0,000
18,005	0,800	0,059	0,059	0,041	0,181	0,060	0,000
20,728	0,809	0,071	0,071	0,049	0,209	0,086	0,000
21,705	0,812	0,075	0,075	0,052	0,219	0,095	0,000
25,051	0,819	0,089	0,089	0,061	0,254	0,127	0,046
26,128	0,821	0,093	0,093	0,064	0,265	0,137	0,065
27,110	0,823	0,098	0,098	0,067	0,275	0,147	0,082
28,090	0,824	0,102	0,102	0,070	0,285	0,156	0,098
29,071	0,825	0,106	0,106	0,073	0,295	0,165	0,115
30,563	0,827	0,112	0,112	0,077	0,311	0,179	0,141

Tabel L16. 3 Beban, Kedalaman Retak dan Lebar Retak Pelat HPFRC-3

Beban	Kedalaman Retak relatif	PBE	TPB	F&M	ACI	Eurocode	AS3600
P	ξ	W_{maks}	W_{maks}	W_{maks}	W_{maks}	W_{maks}	W_{maks}
kN	-	mm	mm	mm	mm	mm	mm
0,218	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,653	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,088	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000
2,098	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000
5,042	0,003	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000
10,435	0,007	0,000	0,000	0,000	0,007	0,000	0,000
15,351	0,010	0,001	0,001	0,000	0,010	0,000	0,000
17,329	0,012	0,001	0,001	0,001	0,012	0,000	0,000
18,755	0,013	0,001	0,001	0,001	0,013	0,000	0,000
17,475	0,042	0,003	0,003	0,002	0,013	0,000	0,000
15,694	0,098	0,006	0,006	0,005	0,015	0,000	0,000
11,141	0,267	0,011	0,011	0,009	0,020	0,000	0,000
7,117	0,527	0,012	0,012	0,008	0,038	0,000	0,000
7,206	0,639	0,014	0,014	0,010	0,056	0,000	0,000
8,289	0,700	0,019	0,019	0,013	0,073	0,000	0,000
9,720	0,736	0,025	0,025	0,017	0,091	0,000	0,000
11,303	0,761	0,031	0,031	0,022	0,109	0,000	0,000
12,961	0,778	0,038	0,038	0,027	0,127	0,006	0,000
14,661	0,791	0,045	0,045	0,031	0,145	0,023	0,000
16,385	0,800	0,053	0,053	0,036	0,163	0,039	0,000
18,124	0,808	0,060	0,060	0,042	0,181	0,056	0,000
19,872	0,814	0,068	0,068	0,047	0,199	0,072	0,000
20,732	0,817	0,071	0,071	0,049	0,208	0,080	0,000
21,226	0,818	0,073	0,073	0,051	0,213	0,085	0,000
24,170	0,825	0,086	0,086	0,059	0,243	0,113	0,025
25,148	0,826	0,090	0,090	0,062	0,253	0,122	0,039
26,132	0,828	0,094	0,094	0,065	0,263	0,131	0,053
27,113	0,830	0,098	0,098	0,068	0,273	0,140	0,067
28,093	0,831	0,102	0,102	0,071	0,283	0,150	0,081
29,075	0,832	0,106	0,106	0,073	0,294	0,159	0,095
30,055	0,833	0,111	0,111	0,076	0,304	0,168	0,108
31,039	0,834	0,115	0,115	0,079	0,314	0,177	0,122
32,019	0,835	0,119	0,119	0,082	0,324	0,187	0,136
33,091	0,852	0,132	0,132	0,091	0,331	0,194	0,148
33,794	0,898	0,164	0,164	0,112	0,326	0,194	0,148

Tabel L16. 4 Beban, Kedalaman Retak dan Lebar Retak Pelat HPFRC-4

Beban	Kedalaman Retak relatif	PBE	TPB	F&M	ACI	Eurocode	AS3600
P	ξ	w_{maks}	w_{maks}	w_{maks}	w_{maks}	w_{maks}	w_{maks}
kN	-	mm	mm	mm	mm	mm	mm
0,243	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,212	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000
2,113	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000
5,054	0,003	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000
10,450	0,006	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,000
11,430	0,007	0,000	0,000	0,000	0,007	0,000	0,000
12,409	0,008	0,000	0,000	0,000	0,007	0,000	0,000
13,129	0,008	0,000	0,000	0,000	0,008	0,000	0,000
14,300	0,009	0,000	0,000	0,000	0,009	0,000	0,000
15,356	0,009	0,000	0,000	0,000	0,009	0,000	0,000
16,342	0,010	0,000	0,000	0,000	0,010	0,000	0,000
17,331	0,011	0,001	0,001	0,000	0,010	0,000	0,000
18,320	0,011	0,001	0,001	0,001	0,011	0,000	0,000
19,869	0,002	0,000	0,000	0,000	0,012	0,000	0,000
18,632	0,036	0,002	0,002	0,002	0,012	0,000	0,000
17,560	0,066	0,004	0,004	0,003	0,013	0,000	0,000
13,565	0,194	0,009	0,009	0,008	0,017	0,000	0,000
11,074	0,290	0,010	0,010	0,009	0,020	0,000	0,000
7,054	0,546	0,010	0,010	0,007	0,038	0,000	0,000
7,178	0,654	0,013	0,013	0,009	0,055	0,000	0,000
8,285	0,713	0,017	0,017	0,012	0,073	0,000	0,000
9,734	0,748	0,022	0,022	0,015	0,091	0,000	0,000
19,955	0,823	0,060	0,060	0,042	0,198	0,065	0,000
20,269	0,824	0,061	0,061	0,042	0,202	0,068	0,000
24,184	0,833	0,076	0,076	0,053	0,242	0,105	0,022
25,657	0,836	0,082	0,082	0,056	0,257	0,119	0,041
26,147	0,836	0,084	0,084	0,058	0,261	0,124	0,047
27,619	0,838	0,089	0,089	0,061	0,276	0,137	0,066
28,109	0,839	0,091	0,091	0,063	0,281	0,142	0,072
29,582	0,841	0,096	0,096	0,066	0,296	0,156	0,091
30,069	0,841	0,098	0,098	0,068	0,301	0,161	0,097
31,649	0,843	0,104	0,104	0,072	0,317	0,175	0,117
32,033	0,843	0,106	0,106	0,073	0,321	0,179	0,122
33,411	0,872	0,125	0,125	0,086	0,329	0,188	0,135
33,505	0,871	0,124	0,124	0,085	0,329	0,188	0,135

Tabel L16. 5 Beban dan Lebar Retak Pelat Hasil Uji Lentur Pelat

HPFRC-1		HPFRC-2		HPFRC-3		HPFRC-4	
P	W _{maks}	P	W _{maks}	P	W _{maks}	P	W _{maks}
kN	mm	kN	mm	kN	mm	kN	mm
1,599	-0,010	1,604	-0,012	1,607	0,000	1,622	0,007
2,090	0,000	2,094	-0,012	2,098	0,000	2,113	0,014
2,580	-0,005	2,585	-0,006	2,588	-0,001	2,603	0,006
3,071	-0,005	3,075	-0,007	3,079	0,000	3,094	0,008
4,542	-0,005	4,547	-0,007	4,550	-0,001	4,565	0,013
5,033	-0,005	5,037	-0,007	5,041	-0,001	5,056	0,014
5,523	-0,001	5,528	-0,013	5,531	-0,001	5,546	-0,019
6,014	-0,001	6,018	-0,007	6,022	-0,001	6,037	0,005
6,504	-0,001	6,509	-0,014	6,512	-0,001	6,527	0,012
9,447	-0,001	9,452	-0,008	9,455	-0,002	9,470	0,004
9,938	-0,001	9,942	-0,008	9,946	-0,003	9,961	0,000
10,428	-0,002	10,433	-0,008	10,436	-0,002	10,451	0,012
10,919	-0,002	10,923	-0,008	10,927	-0,003	10,942	0,003
11,409	-0,002	11,414	-0,008	11,417	-0,003	11,432	0,013
11,900	-0,002	11,855	-0,002	11,908	-0,003	11,923	0,011
12,390	-0,002	11,904	-0,032	12,398	-0,003	12,413	0,011
14,352	0,002	26,129	-0,063	27,113	-0,036	27,128	0,018
14,843	0,003	26,619	-0,062	27,604	-0,034	27,619	0,012
15,333	0,008	27,110	-0,050	28,094	-0,045	28,109	0,009
15,824	0,007	27,600	-0,057	28,585	-0,036	28,600	-0,027
16,020	0,024	27,610	-0,057	29,075	-0,034	29,090	-0,033
16,314	0,024	28,091	-0,057	29,566	-0,030	29,581	-0,033
16,805	0,026	28,581	-0,057	30,056	-0,047	30,071	-0,028
17,001	0,025	29,072	-0,058	30,547	-0,041	30,562	-0,035
17,295	0,023	29,562	-0,014	31,037	-0,038	31,052	-0,016
25,143	0,072	30,239	0,084	33,372	-0,014	32,033	0,021
25,634	0,091	30,367	0,088	33,391	-0,041	32,975	0,070
26,124	0,088	30,367	0,095	33,372	0,015	32,975	0,070
26,615	0,089	30,288	0,090	33,382	0,021	32,779	0,070
27,105	0,090	30,886	0,076	33,450	0,081	32,985	0,054
27,596	0,084	30,543	0,099	33,441	0,088	33,103	0,067
28,086	0,081	30,553	0,091	33,323	0,091	33,142	0,076
28,577	0,085	30,435	0,111	33,539	0,101	33,436	0,087
29,067	0,087	30,229	0,121	33,774	0,130	33,495	0,112
29,381	0,095	30,563	0,125	33,794	0,137	33,505	0,112

Tabel L16. 6. Beban dan Lebar Retak Pelat Hasil Analisis Tegangan Lekat

Kondisi Pelat	HPFRC-1		HPFRC-2		HPFRC-3		HPFRC-4	
	Teg. Lekat	Slip	Teg. Lekat	Slip	Teg. Lekat	Slip	Teg. Lekat	Slip
	u_{b0}	s_0	u_{b0}	s_0	u_{b0}	s_0	u_{b0}	s_0
Retak 1	1,332	0,001	1,243	0,001	1,688	0,001	1,662	0,001
Retak 2	5,343	0,009	5,276	0,008	6,587	0,013	8,332	0,018
Retak 3	5,596	0,018	5,794	0,016	6,365	0,025	7,250	0,037
Retak 4	5,695	0,028	5,595	0,024	6,489	0,036	9,151	0,056
Retak 5	5,810	0,039	6,152	0,035	7,620	0,051	9,624	0,078
Retak 6	6,101	0,052	6,077	0,047	6,243	0,061	7,770	0,104
Retak 7	6,220	0,066	6,140	0,060	6,537	0,076	6,594	0,114
Retak 8	6,475	0,085			6,832	0,088	6,769	0,125
					6,413	0,099	6,923	0,136
							6,940	0,147
Runtuh	6,553	0,105	6,276	0,074	9,143	0,120	6,978	0,159
Rerata	5,458	0,105	5,319	0,074	6,392	0,120	7,090	0,159

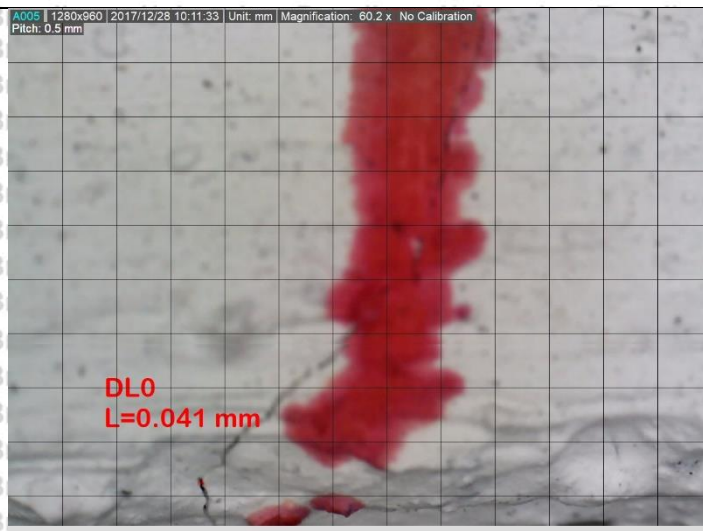


Tabel L16. 7 Foto lebar retak menggunakan mikroskop dino-lite

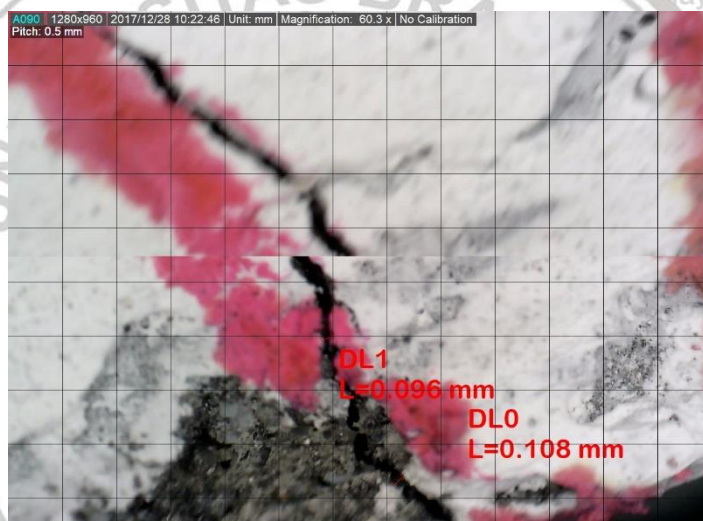
Kondisi

HPFRC-1

Retak I



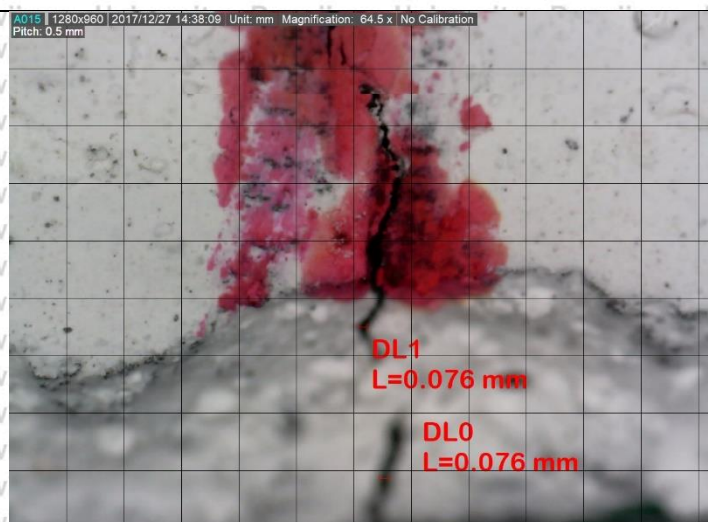
Saat runtuh



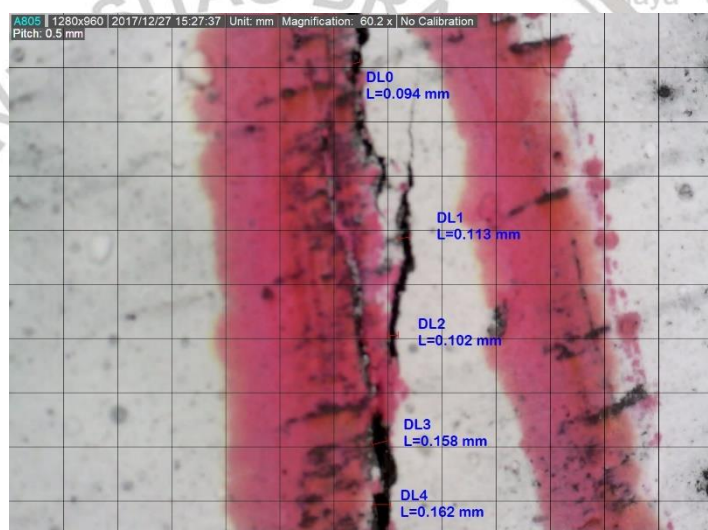
Kondisi

HPFRC-2

Retak I

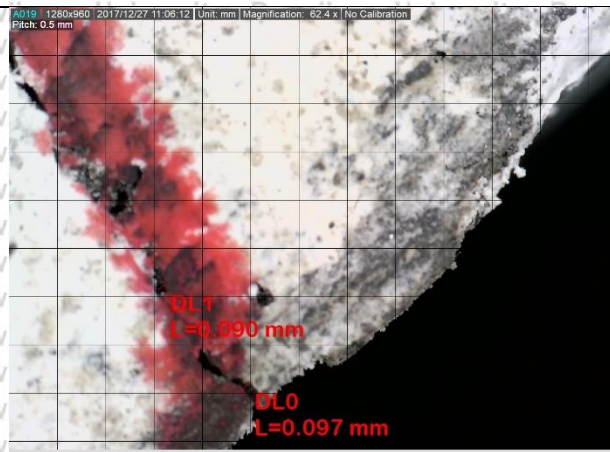


Saat runtuh

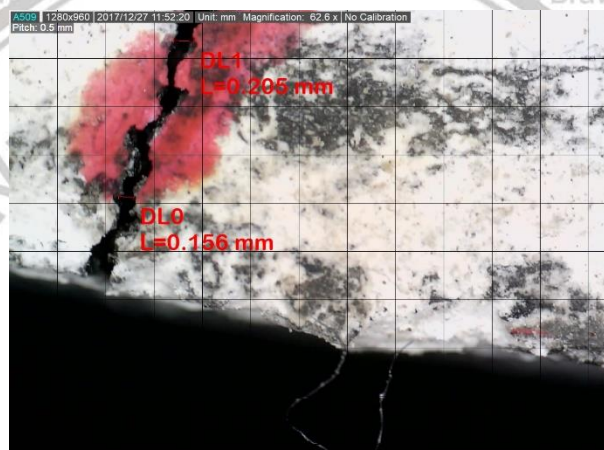


Kondisi HPERC-3

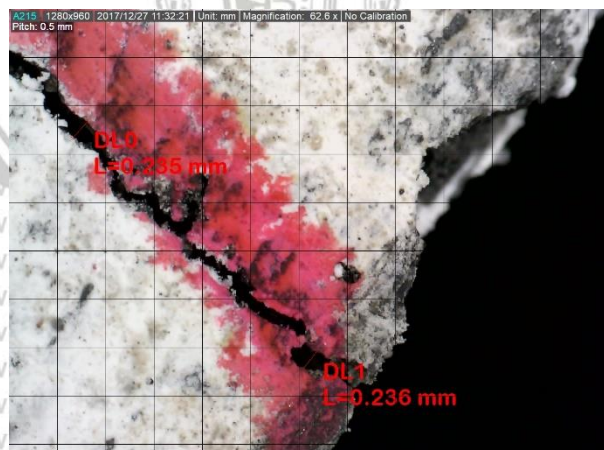
Retak I



Saat baja leleh

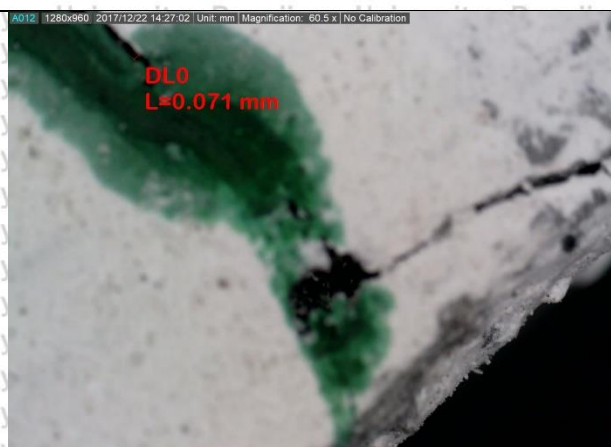


Saat runtuh

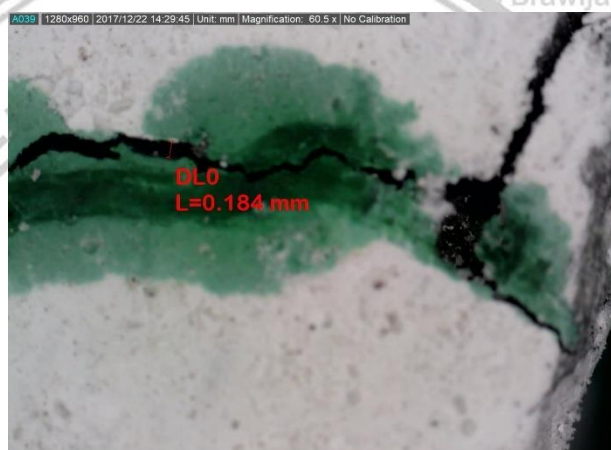


Kondisi HPFRC-4

Retak I



Saat baja leleh



Saat runtuh

